



UNED SERRA

CURSO DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

MÓDULO: TEMPERATURA



1ª EDIÇÃO
Janeiro 2006

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
1.1 TEMPERATURA E CALOR	4
1.2 ESCALAS DE TEMPERATURA	4
1.2.1 ESCALAS	5
1.2.2 CONVERSÃO DE ESCALAS	5
1.2.3 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA	6
ITS-90	7
2. MEDIDORES DE TEMPERATURA POR DILATAÇÃO/EXPANSÃO	8
2.1 TERMÔMETRO A DILATAÇÃO DE LÍQUIDO	8
2.1.1 CARACTERÍSTICAS	8
2.1.2 TERMÔMETROS DE DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE DE VIDRO	8
2.1.3 TERMÔMETRO DE DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE METÁLICO.	9
2.2 TERMÔMETROS À PRESSÃO DE GÁS	11
2.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	11
2.2 CARACTERÍSTICAS	11
2.3 TERMÔMETRO À PRESSÃO DE VAPOR	12
2.3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	12
2.4 TERMÔMETROS À DILATAÇÃO DE SÓLIDOS (TERMÔMETROS BIMETÁLICOS)	13
2.4.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	13
2.4.2 CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUÇÃO	13
3 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOPAR	14
3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS	14
3.2 EFEITO TERMOELÉTRICO DE SEEBECK	15
3.3 - EFEITO TERMOELÉTRICO DE PELTIER	15
3.4 - EFEITO TERMOELÉTRICO DE THOMSON	16
3.5 - EFEITO TERMOELÉTRICO VOLTA	16
3.6 - LEIS TERMOELÉTRICAS	16
LEI DO CIRCUITO HOMOGÊNEO	16
LEI DOS METAIS INTERMEDIÁRIOS	16
LEI DAS TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS	17
3.5 - CORRELAÇÃO DA F.E.M. EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	17
3.6 - TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS TERMOPARES	18
3.6.1 - TERMOPARES BÁSICOS	18
3.6.2 - TERMOPARES NOBRES	19
3.6.3 - NOVOS TIPOS DE TERMOPARES	20
3.7 - CORREÇÃO DA JUNTA DE REFERÊNCIA	21
3.8 - ASSOCIAÇÃO DE TERMOPARES	22
3.8.1 - ASSOCIAÇÃO SÉRIE	22
3.8.2 - ASSOCIAÇÃO SÉRIE - OPOSTA	22
3.8.3 ASSOCIAÇÃO EM PARALELO	22
3.9 - FIOS DE COMPENSAÇÃO E EXTENSÃO	23
3.10 - ERROS DE LIGAÇÃO	23
3.10.1 - USANDO FIOS DE COBRE	23
3.10.2 - INVERSÃO SIMPLES	24
3.10.3 - INVERSÃO DUPLA	25

3.11 - TERMOPAR DE ISOLAÇÃO MINERAL	26
3.11.1 - VANTAGENS DOS TERMOPARES DE ISOLAÇÃO MINERAL	26
<u>4 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMORRESISTÊNCIA</u>	<u>27</u>
4.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	27
4.2 - CONSTRUÇÃO FÍSICA DO SENSOR	28
4.3 - CARACTERÍSTICAS DA TERMORESISTÊNCIA DE PLATINA	28
4.4 - VANTAGENS E DESVANTAGENS	29
4.5 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO	29
4.5.1 - LIGAÇÃO À 2 FIOS	30
4.5.2 - LIGAÇÃO À 3 FIOS	30
<u>5 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO</u>	<u>31</u>
5.1 - TEORIA DA MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO	31
5.2- PIRÔMETROS ÓPTICOS	33
5.3 - RADIÔMETRO OU PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO	34
<u>EXERCÍCIOS</u>	<u>36</u>

1. INTRODUÇÃO

O objetivo de se medir e controlar as diversas variáveis físicas em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, a custos compatíveis com as necessidades do mercado consumidor.

Nos diversos segmentos de mercado sejam, eles químico, petroquímico, siderúrgico, cerâmico, farmacêutico, vidreiro, alimentício, papel e celulose, hidrelétrico, nuclear entre outros, a monitoração da variável Temperatura é fundamental para a obtenção do produto final especificado.

Termometria significa "Medição de Temperatura". Eventualmente o termo Pirometria é também aplicado com o mesmo significado, porém, baseando-se na etimologia das palavras, podemos definir:

PIROMETRIA - Medição de altas temperaturas, na faixa onde os efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.

CRIOMETRIA - Medição de baixas temperaturas, ou seja, aquelas próximas ao zero absoluto de temperatura.

TERMOMETRIA - Termo mais abrangente que incluiria tanto a Pirometria, como a Criometria que seriam casos particulares de medição.

1.1 TEMPERATURA E CALOR

Todas as substâncias são constituídas de pequenas partículas, as moléculas que se encontram em contínuo movimento. Quanto mais rápido o movimento das moléculas mais quente se apresenta o corpo e quanto mais lento mais frio se apresenta o corpo.

Então definiu-se Temperatura como o grau de agitação térmica das moléculas.

Na prática a temperatura é representada em uma escala numérica, onde, quanto maior o seu valor, maior é a energia cinética média dos átomos do corpo em questão.

Outros conceitos que se confundem às vezes com o de temperatura são:

. Energia Térmica.

. Calor.

A Energia Térmica de um corpo é a somatória das energias cinéticas, dos seus átomos, e além de depender da temperatura, depende também da massa e do tipo de substância.

Calor é energia em trânsito ou a forma de energia que é transferida através da fronteira de um sistema em virtude da diferença de temperatura.

Até o final do século XVI, quando foi desenvolvido o primeiro dispositivo para avaliar temperatura, os sentidos do nosso corpo foram os únicos elementos de que dispunham os homens para dizer se um certo corpo estava mais quente ou frio do que um outro, apesar da inadequação destes sentidos sob ponto de vista científico.

1.2 ESCALAS DE TEMPERATURA

Desde o início da termometria, os cientistas, pesquisadores e fabricantes de termômetro, sentiam a dificuldade para atribuir valores de forma padronizada à temperatura por meio de escalas reproduzíveis, como existia na época, para Peso, Distância, Tempo.

Em 1706 Daniel Gabriel Fahrenheit, um fabricante de termômetros de Amsterdã, definiu uma escala de temperatura, a qual possui 3 pontos de referência – 0, 48 e 96. Números que representavam nas suas palavras o seguinte:- "...48 no meu termômetro é o meio entre o frio mais intenso produzido artificialmente por uma mistura de água, gelo e sal-amoníaco, ou mesmo sal comum, e aquela que é encontrada (Temperatura) no sangue de um homem saudável ..."

Fahrenheit encontrou, que na sua escala o ponto de fusão do gelo valia 32 e o de ebulição da água 212 aproximadamente. Estes pontos, posteriormente foram considerados mais reproduzíveis e foram definidos como exatos e adotados como referência.

Em 1742, Anders Celsius, professor de Astronomia na Suécia, propôs uma escala com o zero no ponto de ebulição da água e 100 no ponto de fusão do gelo, no ano seguinte Christian de Lyons independentemente sugeriu a familiar escala centígrada (atualmente chamada escala Celsius).

1.2.1 Escalas

As escalas que ficaram consagradas pelo uso foram Fahrenheit e a Celsius. A escala Fahrenheit é definida atualmente com o valor 32 no ponto de fusão do gelo e 212 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre estes dois pontos é dividido em 180 partes iguais, e cada parte é um grau Fahrenheit. Toda temperatura na escala Fahrenheit é identificada com o símbolo "°F" colocado após o número (ex. 250°F).

A escala Celsius é definida atualmente com o valor zero no ponto de fusão do gelo e 100 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre os dois pontos está dividido em 100 partes iguais, e cada parte é um grau Celsius. A denominação "grau centígrado" utilizada anteriormente no lugar de "Grau Celsius", não é mais recomendada, devendo ser evitado o seu uso.

A identificação de uma temperatura na escala Celsius é feita com o símbolo " °C " colocado após o número (Ex.: 160°C).

Tanto a escala Celsius como a Fahrenheit, são relativas, ou seja, os seus valores numéricos de referência são totalmente arbitrários.

Se abaixarmos a temperatura continuamente de uma substância, atingimos um ponto limite além do qual é impossível ultrapassar, pela própria definição de temperatura. Este ponto, onde cessa praticamente todo movimento atômico, é o zero absoluto de temperatura.

Através da extrapolação das leituras do termômetro à gás, pois os gases se liquefazem antes de atingir o zero absoluto, calculou-se a temperatura deste ponto na escala Celsius em - 273,15°C.

Existem escalas absolutas de temperatura, assim chamadas porque o zero delas é fixado no zero absoluto de temperatura.

Existem duas escalas absolutas atualmente em uso; a Escala Kelvin e a Rankine.

A Escala Kelvin possui a mesma divisão da Celsius, isto é, um grau Kelvin é igual à um grau Celsius, porém o seu zero se inicia no ponto de temperatura mais baixa possível, 273,15 graus abaixo do zero da Escala Celsius.

A Escala Rankine possui obviamente o mesmo zero da escala Kelvin, porém sua divisão é idêntica à da Escala Fahrenheit. A representação das escalas absolutas é análoga às escalas relativas:- Kelvin ==> 400K (sem o símbolo de grau " ° "). Rankine ==> 785R.

A Escala Fahrenheit é usada principalmente na Inglaterra e Estados Unidos da América, porém seu uso tem declinado a favor da Escala Celsius de aceitação universal.

A Escala Kelvin é utilizada nos meios científicos no mundo inteiro e deve substituir no futuro a escala Rankine quando estiver em desuso a Fahrenheit.

Existe uma outra escala relativa a Reamur, hoje já praticamente em desuso. Esta escala adota como zero o ponto de fusão do gelo e 80 o ponto de ebulição da água. O intervalo é dividido em oitenta partes iguais. (Representação - °Re).

1.2.2 Conversão de escalas

A figura à seguir, compara as escalas de temperaturas existentes

	escalas absolutas		escalas relativas	
	°R	K	°C	°F
Ponto de ebulição da água	671,67	373,15	100	212
Ponto de fusão do gelo	491,67	273,15	0	32
Zero absoluto	0	0	-273,15	-459,67

Desta comparação podemos retirar algumas relações básicas entre as escalas:

CELSIUS x FAHRENHEIT

$$^{\circ}\text{C} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{9} \times 5$$

CELSIUS x KELVIN

$$\text{K} = 273,15 + ^{\circ}\text{C}$$

FAHRENHEIT x RANKINE

$$\text{R} = 459,67 + ^{\circ}\text{F}$$

KELVIN x RANKINE

$$\text{K} = \frac{\text{R} \times 5}{9}$$

Outras relações podem ser obtidas combinando as apresentadas entre si.

Exemplo:

O ponto de ebulição do oxigênio é $-182,86^{\circ}\text{C}$. Expressar esta temperatura em: a) K; b) $^{\circ}\text{F}$; c) R.

a) $^{\circ}\text{C}$ p/ K : $\text{K} = 273,15 + (-182,86) = 90,29\text{K}$

b) $^{\circ}\text{C}$ p/ $^{\circ}\text{F}$: $^{\circ}\text{F} = \frac{^{\circ}\text{C} \times 9}{5} + 32 = \frac{-182,86 \times 9}{5} + 32 = -297,15^{\circ}\text{F}$

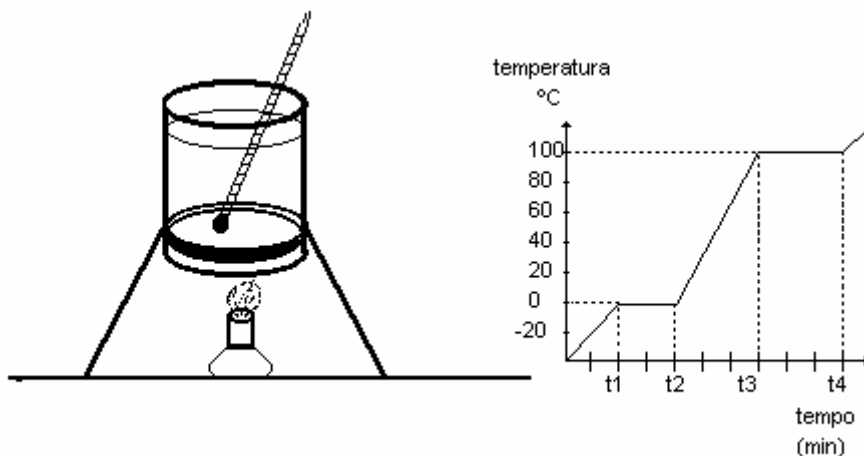
c) $^{\circ}\text{C}$ p/ R :- ou melhor, $^{\circ}\text{C}$ p/ K p/ $^{\circ}\text{R}$: $^{\circ}\text{R} = \frac{\text{K} \times 9}{5} = \frac{90,29 \times 9}{5} = 162,52\text{ R}$

1.2.3 Escala Internacional de Temperatura

Para melhor expressar as leis da termodinâmica, foi criada uma escala baseada em fenômenos de mudança de estado físico de substâncias puras, que ocorrem em condições únicas de temperatura e pressão. São chamados de pontos fixos de temperatura.

Chama-se esta escala de IPTS - Escala Prática Internacional de Temperatura. A primeira escala prática internacional de temperatura surgiu em 1927 modificada em 1948 (IPTS-48). Em 1960 mais modificações foram feitas e em 1968 uma nova Escala Prática Internacional de Temperatura foi publicada (IPTS-68).

A mudança de estado de substâncias puras (fusão, ebulição) é normalmente desenvolvida sem alteração na temperatura. Todo calor recebido ou cedido pela substância é utilizado pelo mecanismo de mudança de estado.



Os pontos fixos utilizados pela IPTS-68 são dados na tabela abaixo

ESTADO DE EQUILÍBRIO	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)
Ponto triplo do hidrogênio	-259,34
Ponto de ebulição do hidrogênio	-252,87
Ponto de ebulição do neônio	-246,048
Ponto triplo do oxigênio	-218,789

Ponto de ebulição do oxigênio	-182,962
Ponto triplo da água	0,01
Ponto de ebulição da água	100,00
Ponto de solidificação do zinco	419,58
Ponto de solidificação da prata	916,93
Ponto de solidificação do ouro	1064,43

Observação

Ponto triplo é o ponto em que as fases sólida, líquida e gasosa encontram-se em equilíbrio.

A ainda atual IPTS-68 cobre uma faixa de -259,34 a 1064,34°C, baseada em pontos de fusão, ebulição e pontos triplos de certas substâncias puras como por exemplo o ponto de fusão de alguns metais puros.

Hoje já existe a ITS-90 Escala Internacional de Temperatura, definida em fenômenos determinísticos de temperatura e que definiu alguns pontos fixos de temperatura.

PONTOS FIXOS	IPTS-68	ITS-90
Ebulição do Oxigênio	-182,962°C	-182,954°C
Ponto triplo da água	+0,010°C	+0,010°C
Solidificação do estanho	+231,968°C	+231,928°C
Solidificação do zinco	+419,580°C	+419,527°C
Solidificação da prata	+961,930°C	+961,780°C
Solidificação do ouro	+1064,430°C	+1064,180°C

Com o desenvolvimento tecnológico diferente em diversos países, criou-se uma série de normas e padronizações, cada uma atendendo uma dada região.

As mais importantes são:

ISA - AMERICANA

DIN - ALEMÃ

JIS - JAPONESA

BS - INGLESA

UNI - ITALIANA

Para atender as diferentes especificações técnicas na área da termometria, cada vez mais se somam os esforços com o objetivo de unificar estas normas. Para tanto, a Comissão Internacional Eletrotécnica - IEC, vem desenvolvendo um trabalho junto aos países envolvidos neste processo normativo, não somente para obter normas mais completas e aperfeiçoadas mas também de prover meios para a internacionalização do mercado de instrumentação relativo a termopares.

Como um dos participantes desta comissão, o Brasil através da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, está também diretamente interessado no desdobramento deste assunto e vem adotando tais especificações como Normas Técnicas Brasileiras.

2. MEDIDORES DE TEMPERATURA POR DILATAÇÃO/EXPANSÃO

2.1 TERMÔMETRO A DILATAÇÃO DE LÍQUIDO

2.1.1 Características

Os termômetros de dilatação de líquidos, baseiam-se na lei de expansão volumétrica de um líquido com a temperatura dentro de um recipiente fechado.

A equação que rege esta relação é:

$$V_t = V_o [1 + \beta_1 (\Delta t) + \beta_2 (\Delta t)^2 + \beta_3 (\Delta t)^3]$$

onde:

t = Temperatura do líquido em °C

V_o = Volume do líquido à temp. de referência t_o

V_t = Volume do líquido à temperatura t

β₁, β₂, β₃ = Coeficiente de expansão do líquido °C⁻¹

Δt = t - t_o

Teoricamente esta relação não é linear, porém como os termos de segunda e terceira ordem são desprezíveis, na prática consideramos linear. E daí:

$$V_t = V_o (1 + \beta \cdot \Delta t)$$

Os tipos podem variar conforme sua construção:

.Recipiente de vidro transparente

.Recipiente metálico

2.1.2 Termômetros de dilatação de líquido em recipiente de vidro

É constituído de um reservatório, cujo tamanho depende da sensibilidade desejada, soldada a um tubo capilar de seção a mais uniforme possível fechado na parte superior.

O reservatório e parte do capilar são preenchidos de um líquido. Na parte superior do capilar existe um alargamento que protege o termômetro no caso da temp. ultrapassar seu limite máximo.

Após a calibração, a parede do tubo capilar é graduada em graus ou frações deste. A medição de temperatura se faz pela leitura da escala no ponto em que se tem o topo da coluna líquida.

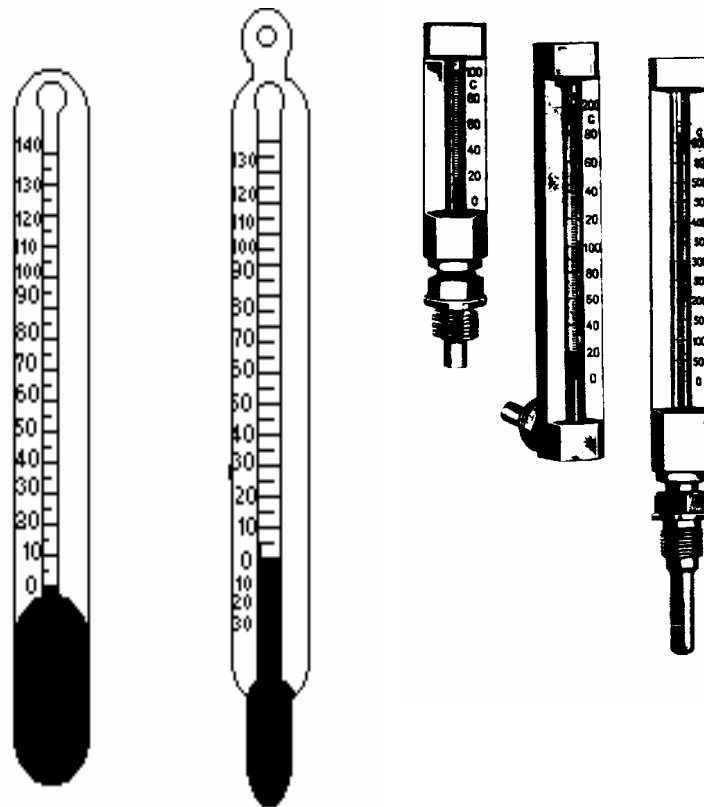
Os líquidos mais usados são: .Mercúrio .Tolueno .Álcool .Acetona

Nos termômetros industriais, o bulbo de vidro é protegido por um poço metálico e o tubo capilar por um invólucro metálico.

LÍQUIDO	PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO(°C)	PONTO DE EBULIÇÃO(°C)	FAIXA DE USO(°C)
Mercúrio	-39	+357	-38 à 550
Álcool Etílico	-115	+78	-100 à 70
Tolueno	-92	+110	-80 à 100

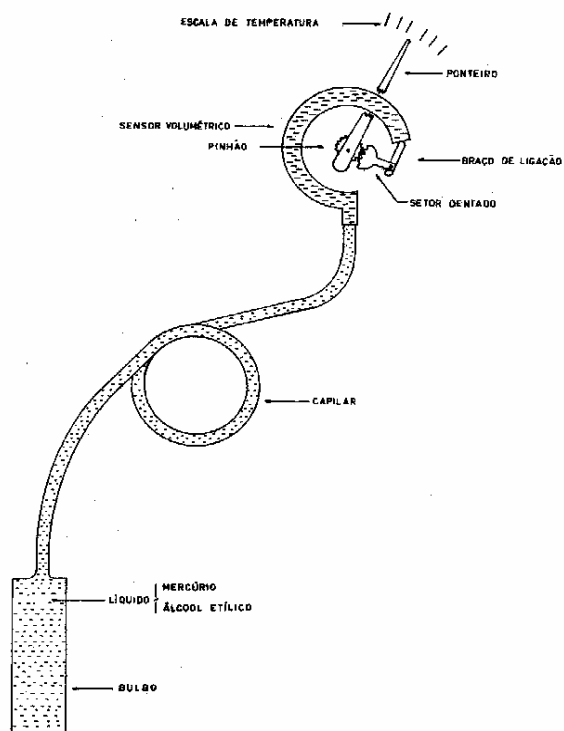
No termômetro de mercúrio, pode-se elevar o limite máximo até 550°C injetando-se gás inerte sob pressão, evitando a vaporização do mercúrio.

Por ser frágil e impossível registrar sua indicação ou transmiti-la à distância, o uso deste termômetro é mais comum em laboratórios ou em indústrias quando com proteção metálica.



2.1.3 Termômetro de dilatação de líquido em recipiente metálico.

Neste termômetro, o líquido preenche todo o recipiente e sob o efeito de um aumento de temperatura se dilata, deformando um elemento extensível (sensor volumétrico).



Características dos elementos básicos deste termômetro:

Bulbo

Suas dimensões variam de acordo com o tipo de líquido e principalmente com a sensibilidade desejada.

A tabela abaixo, mostra os líquidos mais usados e sua faixa de utilização

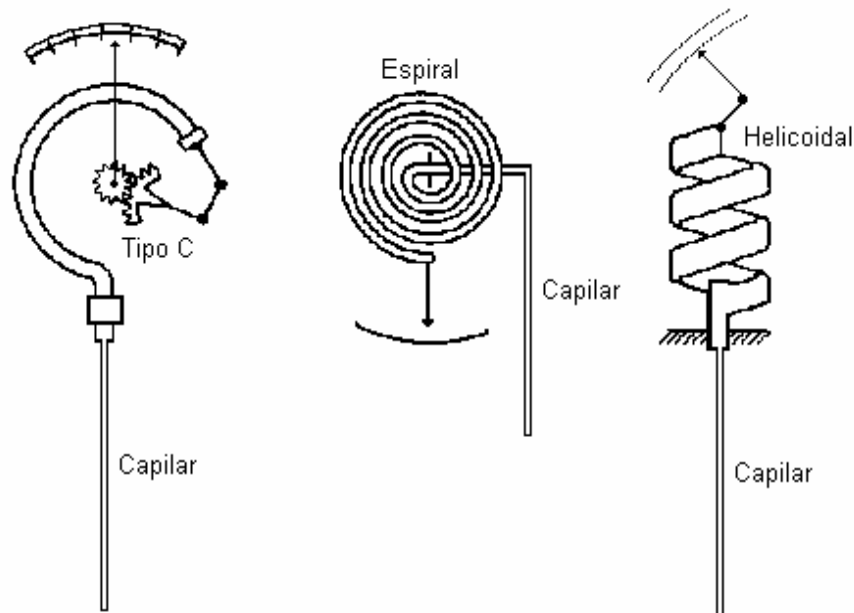
LÍQUIDO	FAIXA DE UTILIZAÇÃO (°C)
Mercúrio	-35 à +550
Xileno	-40 à +400
Tolueno	-80 à +100
Álcool	50 à +150

Capilar

Suas dimensões são variáveis, sendo que o diâmetro interno deve ser o menor possível, a fim de evitar a influencia da temperatura ambiente, porém não deve oferecer resistência a passagem do líquido em expansão.

Elemento de Medição

O elemento usado é o Tubo de Bourdon, podendo ser :



Os materiais mais usados são: bronze fosforoso, cobre - berílio , aço - inox e aço - carbono.

Pelo fato deste sistema utilizar líquido inserido num recipiente e da distância entre o elemento sensor e o bulbo ser considerável, as variações na temperatura ambiente afetam não somente o líquido no bulbo, mas em todo o sistema (bulbo, capilar e sensor) causando erro de indicação ou registro. Este efeito da temperatura ambiente é compensado de duas maneiras que são denominadas classe 1A e classe 1B.

Na classe 1B a compensação é feita somente no sensor, através de uma lamina bimetálica. Este sistema é normalmente preferido por ser mais simples, porém o comprimento máximo do capilar para este sistema de compensação é de aproximadamente 6 metros.

Quando esta distância for maior o instrumento deve possuir sistema de compensação classe 1A, onde a compensação é feita no sensor e no capilar, por meio de um segundo capilar ligado a um elemento de compensação idêntico ao de medição, sendo os dois ligados em oposição.

O segundo capilar tem comprimento idêntico ao capilar de medição, porém não está ligado a um bulbo.

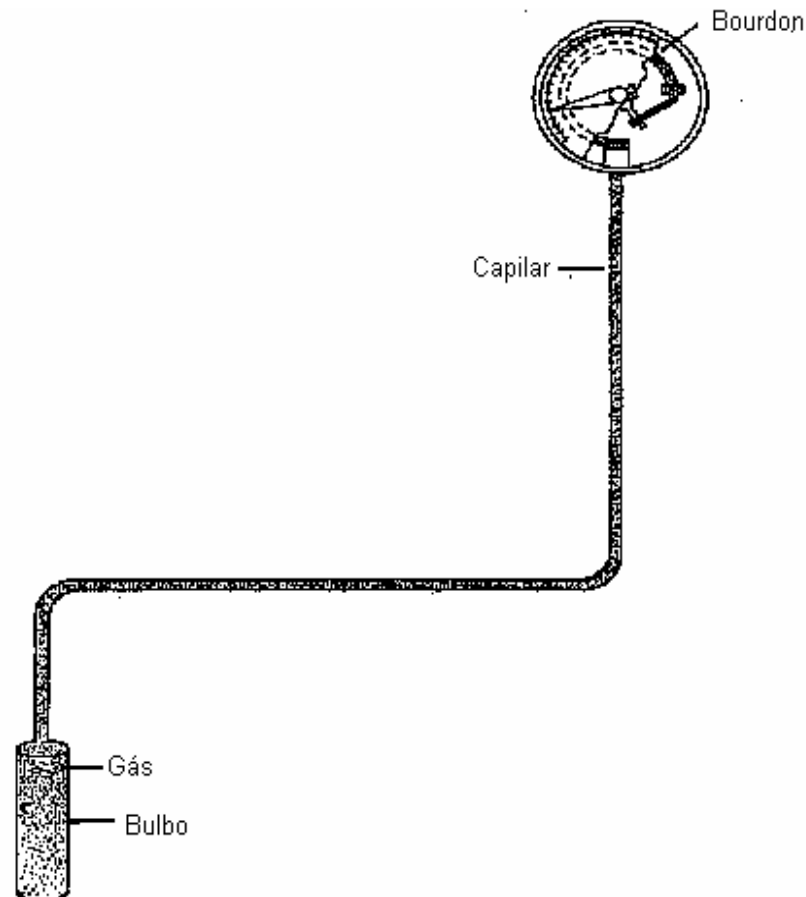
A aplicação destes termômetros, se encontra na indústria em geral para indicação e registro, pois permite leituras remotas e por ser o mais preciso dos sistemas mecânicos de medição de

temperatura, porém não é recomendável para controle por causa de seu tempo de resposta ser relativamente grande (mesmo usando fluido trocador de calor entre bulbo e poço de proteção para diminuir este atraso conforme figura abaixo). O poço de proteção, permite manutenção do termômetro com o processo em operação.

Recomenda-se não dobrar o capilar com curvatura acentuada para que não se forme restrições que prejudicariam o movimento do líquido em seu interior, causando problemas de medição.

2.2 TERMÔMETROS À PRESSÃO DE GÁS

2.2.1 Princípio de funcionamento



Fisicamente idêntico ao termômetro de dilatação de líquido, consta de um bulbo, elemento de medição e capilar de ligação entre estes dois elementos.

O volume do conjunto é constante e preenchido com um gás a alta pressão. Com a variação da temperatura, o gás varia sua pressão conforme, aproximadamente a lei dos gases perfeitos, com o elemento de medição operando como medidor de pressão. A Lei de Gay-Lussac, expressa matematicamente este conceito:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n}{T_n}$$

Observa-se que as variações de pressão são linearmente dependentes da temperatura, sendo o volume constante.

2.2 Características

O gás mais utilizado é o N_2 e geralmente é enchido com uma pressão de 20 a 50 atm., na temperatura mínima a medir. Sua faixa de medição vai de -100 a 600 °C, sendo o limite inferior

devido a própria temperatura crítica do gás e o superior proveniente do recipiente apresentar maior permeabilidade ao gás nesta temperatura , o que acarretaria sua perda inutilizando o termômetro.

Tipos de gás de enchimento

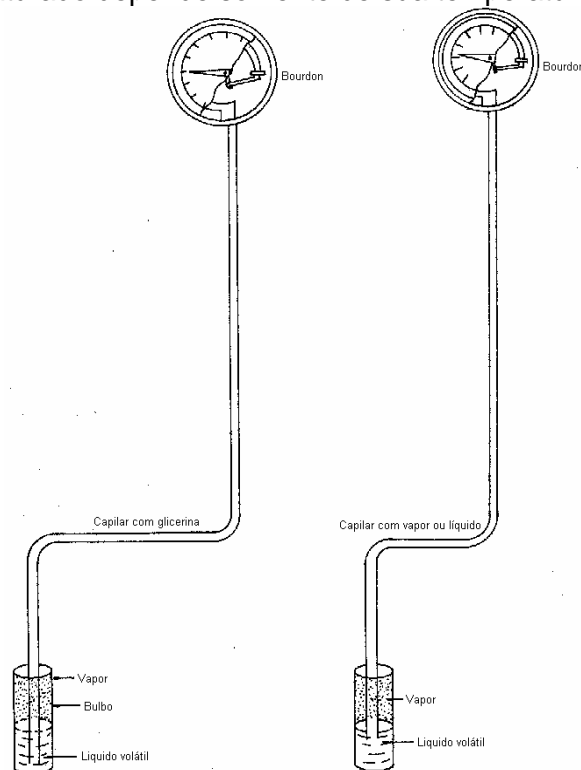
Gás	Temperatura Crítica
Hélio (He)	- 267,8 °C
Hidrogênio (H ₂)	- 239,9 °C
Nitrogênio (N ₂)	- 147,1 °C
Dióxido de Carbono (CO ₂)	- 31,1 °C

2.3 TERMÔMETRO À PRESSÃO DE VAPOR

2.3.1 Princípio de funcionamento

Sua construção é bastante semelhante ao de dilatação de líquidos, baseando o seu funcionamento na Lei de Dalton:

"A pressão de vapor saturado depende somente de sua temperatura e não de seu volume"



Portanto para qualquer variação de temperatura haverá uma variação na tensão de vapor do gás liqüefeito colocado no bulbo do termômetro e, em conseqüência disto, uma variação na pressão dentro do capilar.

A relação existente entre tensão de vapor de um líquido e sua temperatura é do tipo logarítmica e pode ser simplificada para pequenos intervalos de temperatura em:

$$\log P_1 / P_2 = H e . (1/T_1 - 1/T_2) / 4,58$$

onde:

P₁ e P₂ = Pressões absolutas relativas as temperaturas

T₁ e T₂ = Temperaturas absolutas

H e = Representa o calor latente de evaporação do líquido em questão

A tabela a seguir, mostra os líquidos mais utilizados e seus pontos de fusão e ebulição

Líquido	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de ebulição (°C)
Cloreto de Metila	- 139	- 24
Butano	- 135	- 0,5
Eter Etilico	- 119	34
Tolueno	- 95	110
Dióxido de enxofre	- 73	- 10
Propano	- 190	- 42

2.4 TERMÔMETROS À DILATAÇÃO DE SÓLIDOS (TERMÔMETROS BIMETÁLICOS)

2.4.1 Princípio de funcionamento

Baseia-se no fenômeno da dilatação linear dos metais com a temperatura. Sendo:

$$L_t = L_o \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

onde:

t = temperatura do metal em °C

L_o = comprimento do metal à temp. de referência t_o

L_t = comprimento do metal à temp. t

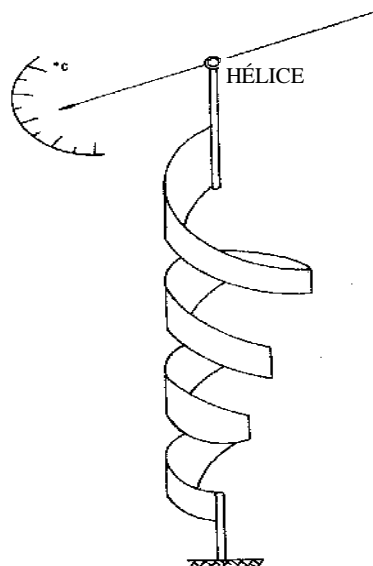
α = coeficiente de dilatação linear

$$\Delta t = t - t_o$$

2.4.2 Características de construção

O termômetro bimetalístico consiste em duas laminas de metais com coeficientes de dilatação diferentes sobrepostas, formando uma só peça. Variando-se a temperatura do conjunto, observa-se um encurvamento que é proporcional a temperatura.

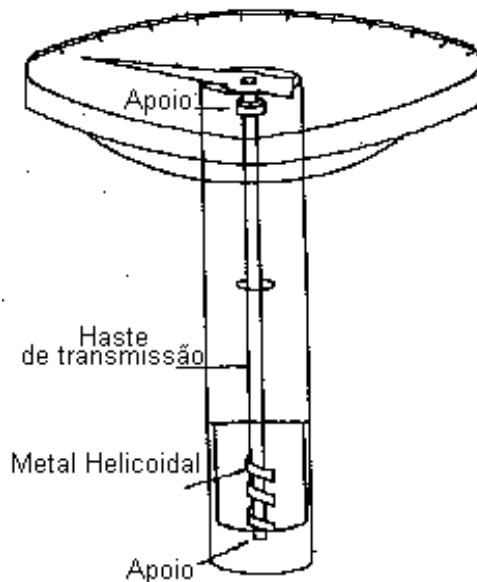
Na prática a lamina bimetalística é enrolada em forma de espiral ou hélice, o que aumenta bastante a sensibilidade.



O termômetro mais usado é o de lamina helicoidal, e consiste em um tubo bom condutor de calor, no interior do qual é fixado um eixo que por sua vez recebe um ponteiro que se desloca sobre uma escala.

Normalmente usa-se o invar (aço com 64% Fe e 36% Ni) com baixo coeficiente de dilatação e o latão como metal de alto coeficiente de dilatação.

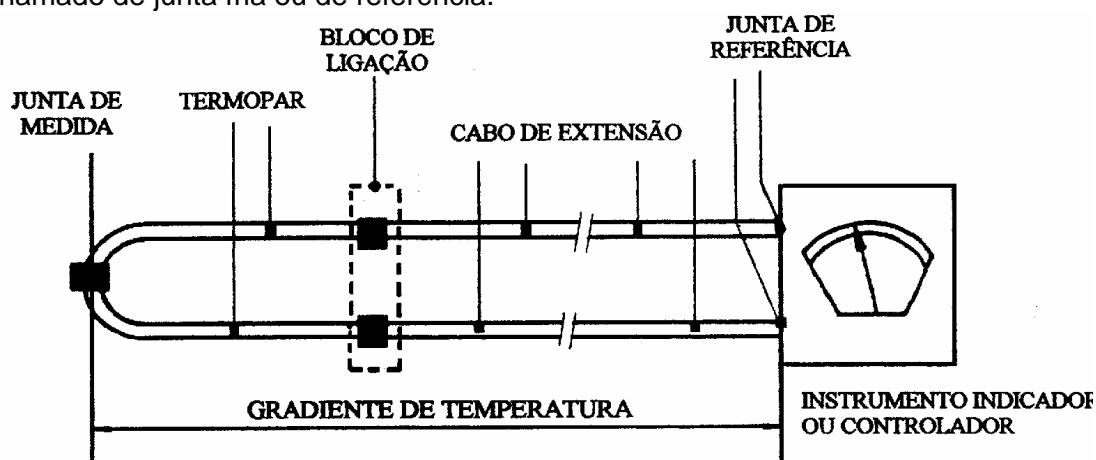
A faixa de trabalho dos termômetros bimetalísticos vai aproximadamente de -50 a 800 °C, sendo sua escala bastante linear. Possui exatidão na ordem de +/- 1%



3 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOPAR

Um termopar consiste de dois condutores metálicos, de natureza distinta, na forma de metais puros ou de ligas homogêneas. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junta quente ou junta de medição. A outra extremidade dos fios é levada ao instrumento de medição de f.e.m. (força eletromotriz), fechando um circuito elétrico por onde flui a corrente.

O ponto onde os fios que formam o termopar se conectam ao instrumento de medição é chamado de junta fria ou de referência.



O aquecimento da junção de dois metais gera o aparecimento de uma f.e.m.. Este princípio conhecido por efeito Seebeck propiciou a utilização de termopares para a medição de temperatura. Nas aplicações práticas o termopar apresenta-se normalmente conforme a figura acima .

O sinal de f.e.m. gerado pelo gradiente de temperatura (ΔT) existente entre as juntas quente e fria, será de um modo geral indicado, registrado ou transmitido.

3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

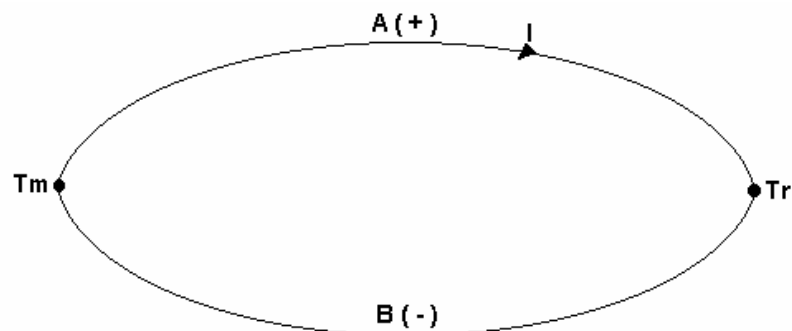
Quando dois metais ou semicondutores dissimilares são conectados e as junções mantidas a diferentes temperaturas, quatro fenômenos ocorrem simultaneamente: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Volta.

A aplicação científica e tecnológica dos efeitos termoelétricos é muito importante e sua utilização no futuro é cada vez mais promissora. Os estudos das propriedades termoelétricas dos semicondutores e dos metais levam, na prática, à aplicação dos processos de medições na geração de energia elétrica (bateria solar) e na produção de calor e frio. O controle de temperatura feito por pares termoelétricos é uma das importantes aplicações do efeito Seebeck.

Atualmente, busca-se o aproveitamento industrial do efeito Peltier, em grande escala, para obtenção de calor ou frio no processo de climatização ambiente.

3.2 EFEITO TERMOELÉTRICO DE SEEBECK

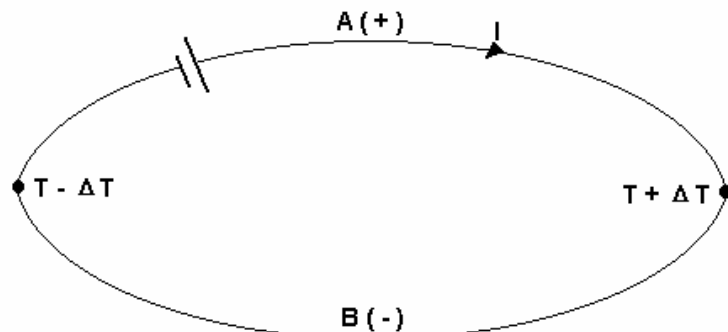
O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por T.J. Seebeck quando ele notou que em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura ΔT entre as suas junções. Denominamos a junta de medição de T_m , e a outra, junta de referência de T_r . A existência de uma f.e.m. térmica AB no circuito é conhecida como efeito Seebeck. Quando a temperatura da junta de referência é mantida constante, verifica-se que a f.e.m. térmica é uma função da temperatura T_m da junção de teste. Este fato permite utilizar um par termoelétrico como um termômetro.



O efeito Seebeck se produz pelo fato de que os elétrons livres de um metal difere de um condutor para outro e depende da temperatura. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas são mantidas a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz a ritmos diferentes.

3.3 - EFEITO TERMOELÉTRICO DE PELTIER

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoelétrico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma bateria exterior, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas da junções variam em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Esta variação adicional de temperatura é o efeito Peltier. O efeito Peltier produz-se tanto pela corrente proporcionada por uma bateria exterior como pelo próprio par termoelétrico.



O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção, sendo independente da temperatura da outra junção. O calor Peltier é reversível. Quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é o mesmo, porém em sentido oposto.

3.4 - EFEITO TERMOELÉTRICO DE THOMSON

Em 1854, Thomson conclui, através das leis da termodinâmica, que a condução de calor, ao longo dos fios metálicos de um par termoelétrico, que não transporta corrente, origina uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio.

Quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição de temperatura em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Essa variação adicional na distribuição da temperatura denomina-se efeito Thomson.

O efeito Thomson depende do metal de que é feito o fio e da temperatura média da pequena região considerada. Em certos metais há absorção de calor, quando uma corrente elétrica flui da parte fria para a parte quente do metal e que há geração de calor quando se inverte o sentido da corrente. Em outros metais ocorre o oposto deste efeito, isto é, há liberação de calor quando uma corrente elétrica flui da parte quente para a parte fria do metal. Conclui-se que, com a circulação de corrente ao longo de um fio condutor, a distribuição de temperatura neste condutor se modificará, tanto pelo calor dissipado por efeito Joule, como pelo efeito Thomson.

3.5 - EFEITO TERMOELÉTRICO VOLTA

A experiência de Peltier pode ser explicada através do efeito Volta enunciado a seguir:

" Quando dois metais estão em contato a um equilíbrio térmico e elétrico, existe entre eles uma diferença de potencial que pode ser da ordem de Volts ".

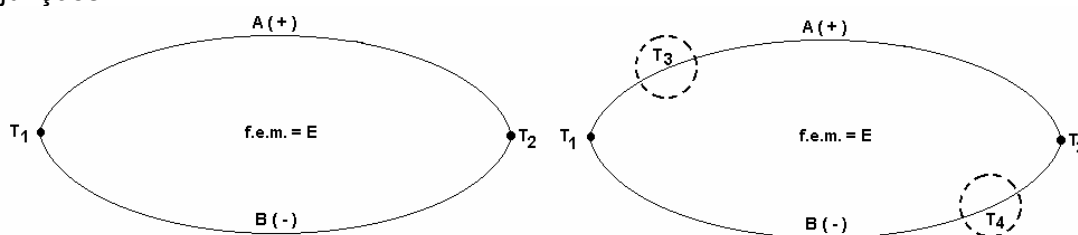
Esta diferença de potencial depende da temperatura e não pode ser medida diretamente.

3.6 - LEIS TERMOELÉTRICAS

Da descoberta dos efeitos termoelétricos partiu-se através da aplicação dos princípios da termodinâmica, a enunciação das três leis que constituem a base da teoria termoelétrica nas medições de temperatura com termopares, portanto, fundamentados nestes efeitos e nestas leis, podemos compreender todos os fenômenos que ocorrem na medida de temperatura com estes sensores.

LEI DO CIRCUITO HOMOGÊNEO

" A f.e.m. termal, desenvolvida em um circuito termoelétrico de dois metais diferentes, com suas junções as temperaturas T_1 e T_2 , é independente do gradiente de temperatura e de sua distribuição ao longo dos fios". Em outras palavras, a f.e.m. medida depende única e exclusivamente da composição química dos dois metais e das temperaturas existentes nas junções.

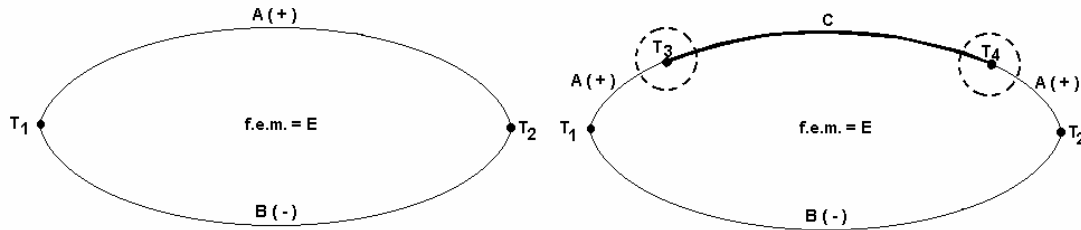


Um exemplo de aplicação prática desta lei é que podemos ter uma grande variação de temperatura em um ponto qualquer, ao longo dos fios termopares, que esta não influirá na f.e.m. produzida pela diferença de temperatura entre as juntas, portanto, pode-se fazer medidas de temperaturas em pontos bem definidos com os termopares, pois o importante é a diferença de temperatura entre as juntas.

LEI DOS METAIS INTERMEDIÁRIOS

" A soma algébrica das f.e.m. termais em um circuito composto de um número qualquer de metais diferentes é zero, se todo o circuito estiver a mesma temperatura". Deduz-se daí que um

circuito termoeletrico, composto de dois metais diferentes, a f.e.m. produzida não será alterada ao inserirmos, em qualquer ponto do circuito, um metal genérico, desde que as novas junções sejam mantidas a temperaturas iguais.



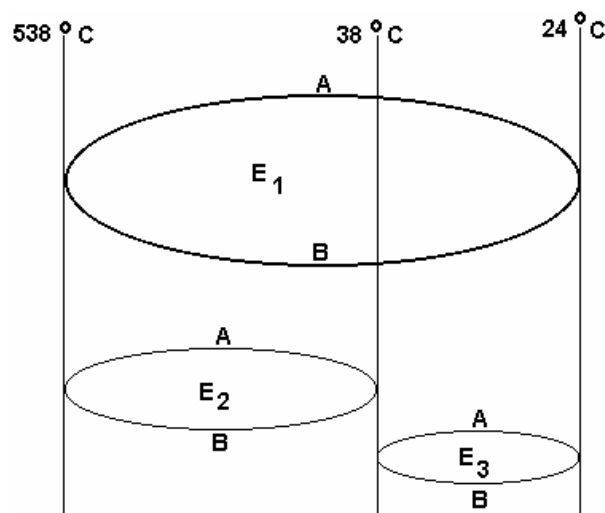
Onde se conclui que:

Se: $T_3 = T_4 \rightarrow E_1 = E_2$

$T_3 = T_4 \rightarrow E_1 = E_2$

Um exemplo de aplicação prática desta lei é a utilização de contatos de latão ou cobre, para interligação do termopar ao cabo de extensão no cabeçote.

LEI DAS TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS

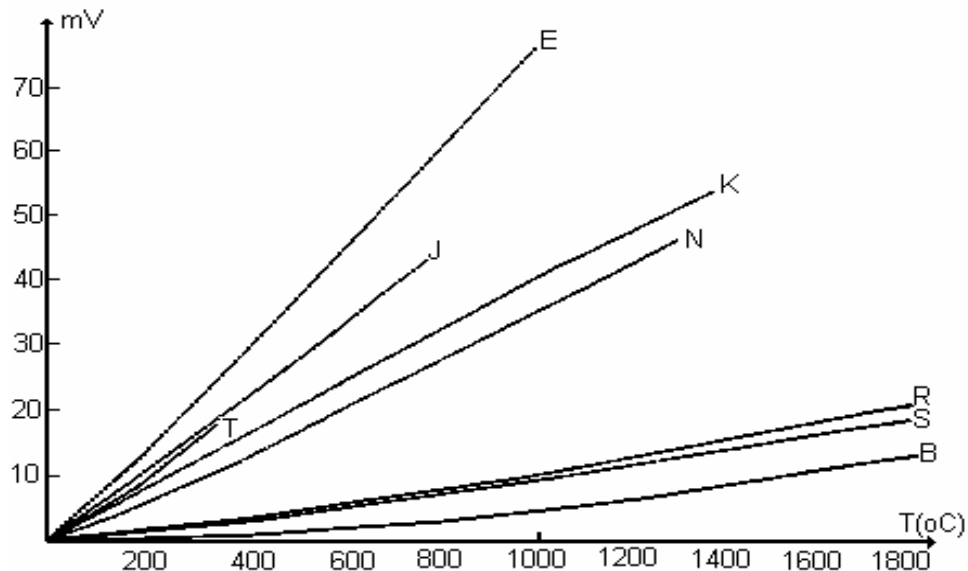


" A f.e.m. produzida em um circuito termoeletrico de dois metais homogêneos e diferentes entre si, com as suas junções as temperaturas T_1 e T_3 respectivamente, é a soma algébrica da f.e.m. deste circuito, com as junções as temperaturas T_1 e T_2 e a f.e.m. deste mesmo circuito com as junções as temperaturas T_2 e T_3 .

Um exemplo prático da aplicação desta lei, é a compensação ou correção da temperatura ambiente pelo instrumento receptor de milivoltagem.

3.5 - CORRELAÇÃO DA F.E.M. EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Visto que a f.e.m. gerada em um termopar depende da composição química dos condutores e da diferença de temperatura entre juntas, isto é, a cada grau de variação de temperatura, podemos observar uma variação da f.e.m. gerada pelo termopar, podemos, portanto, construir uma tabela de correlação entre temperatura e a f.e.m., por uma questão prática padronizou-se o levantamento destas curvas com a junta de referência à temperatura de 0°C .



Essas tabelas foram padronizadas por diversas normas internacionais e levantadas de acordo com a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (IPTS-68), recentemente atualizada pela ITS-90, para os termopares mais utilizados.

A partir dessas tabelas podemos construir um gráfico conforme a figura a seguir ,onde está relacionado a milivoltagem gerada em função da temperatura, para os termopares segundo a norma ISA, com a junta de referência a 0°C.

3.6 - TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS TERMOPARES

Existem várias combinações de 2 metais condutores operando como termopares. As combinações de fios devem possuir uma relação razoavelmente linear entre temperatura e f.e.m.; devem desenvolver uma f.e.m. por grau de mudança de temperatura, que seja detectável pelos equipamentos normais de medição.

Foram desenvolvidas diversas combinações de pares de Ligas Metálicas, desde os mais corriqueiros de uso industrial, até os mais sofisticados para uso especial ou restrito a laboratório.

Essas combinações foram feitas de modo a se obter uma alta potência termoelétrica, aliando-se ainda as melhores características como homogeneidade dos fios e resistência a corrosão, na faixa de utilização, assim cada tipo de termopar tem uma faixa de temperatura ideal de trabalho, que deve ser respeitada, para que se tenha a maior vida útil do mesmo.

Podemos dividir os termopares em três grupos, a saber:

- Termopares Básicos
- Termopares Nobres
- Termopares Especiais

3.6.1 - TERMOPARES BÁSICOS

São assim chamados os termopares de maior uso industrial, em que os fios são de custo relativamente baixo e sua aplicação admite um limite de erro maior .

TIPO T

Nomenclaturas: T - Adotado pela Norma ANSI

CC - Adotado pela Norma JIS

Cu - Co

Cobre - Constantan

Liga: (+) Cobre - (99,9 %)

(-) Constantan - São as ligas de Cu-Ni compreendidos no intervalo entre Cu (50 %) e Cu (65 %) Ni (35 %). A composição mais utilizada para este tipo de termopar é de Cu (58 %) e Ni (42 %).

Características:

Faixa de utilização: - 184 a 370 °C

F.e.m. produzida: - 5,333 a 19,027 mV

Aplicações: Criometria (baixas temperaturas), Indústrias de refrigeração, Pesquisas agrônômicas e ambientais, Química e Petroquímica.

TIPO J

Nomenclaturas: J - Adotada pela Norma ANSI

IC - Adotada pela Norma JIS

Fe-Co

Ferro - Constantan

Liga: (+) Ferro - (99,5 %)

(-) Constantan - Cu (58 %) e Ni (42 %), normalmente se produz o ferro a partir de sua característica caso se o constantan adequado.

Características:

Faixa de utilização: 0 a 760 °C

f.e.m. produzida: 0 a 49,922 mV

Aplicações: Centrais de energia, Metalúrgica, Química, Petroquímica, indústrias em geral.

TIPO E

Nomenclatura: E - Adotada pela Norma ANSI

CE - Adotada pela Norma JIS

NiCr-Co

Liga: (+) Chromel - Ni (90 %) e Cr (10 %)

(-) Constantan - Cu (58 %) e Ni (42 %)

Características:

Faixa de utilização: 0 a 870 °C

f.e.m. produzida: 0 a 66,473 mV

Aplicações: Química e Petroquímica

TIPO K

Nomenclaturas: K - Adotada pela Norma ANSI

CA - Adotada pela Norma JIS

Liga: (+) Chromel - Ni (90 %) e Cr (10 %)

(-) Alumel - Ni(95,4 %), Mn(1,8 %), Si(1,6 %), Al(1,2 %)

Características:

Faixa de utilização: 0 a 1260 °C

f.e.m. produzida: 0 a 50,99 mV

Aplicações: Metalúrgicas, Siderúrgicas, Fundição, Usina de Cimento e Cal, Vidros, Cerâmica, Indústrias em geral.

3.6.2 - TERMOPARES NOBRES

São aqueles que os pares são constituídos de platina. Embora possuam custo elevado e exijam instrumentos receptores de alta sensibilidade, devido à baixa potência termoeletrica, apresentam uma altíssima precisão, dada a homogeneidade e pureza dos fios dos termopares.

TIPO S

Nomenclaturas: S - Adotada pela Norma ANSI

Pt Rh 10 % - Pt

Liga: (+) Platina Rhodio 10 %

(-) Platina 100 %

Características:

Faixa de utilização: 0 a 1480 °C

f.e.m. produzida: 0 a 15,336 mV

Aplicações: Siderúrgica, Fundição, Metalúrgica, Usina de Cimento, Cerâmica, Vidro e Pesquisa Científica.

Observação: É utilizado em sensores descartáveis na faixa de 1200 a 1768 °C, para medição de metais líquidos em Siderúrgicas e Fundições

T I P O R

Nomenclaturas: R - Adotada pela Norma ANSI

PtRh 13 % - Pt

Liga: (+) Platina 87 % Rhodio 13 %

(-) Platina 13 %

Características:

Faixa de utilização: 870 a 1705 °C

f.e.m. produzida: 3,708 a 12,485 mV

Aplicações: As mesmas do tipo S

T I P O B

Nomenclaturas: B - Adotada pela Norma ANSI

PtRh 30 % - PtRh 6 %

Liga: (+) Platina 70 % Rhodio 30 %

(-) Platina 94 % Rhodio 6 %

Características:

Faixa de utilização: 870 a 1705 °C

f.e.m. produzida: 3,708 a 12,485 mV

Aplicações: Vidro, Siderúrgica, alta temperatura em geral.

3.6.3 - NOVOS TIPOS DE TERMOPARES

Ao longo dos anos, os tipos de termopares produzidos oferecem, cada qual, uma característica especial porém, apresentam restrições de aplicação, que devem ser consideradas.

Novos tipos de termopares foram desenvolvidos para atender às condições de processo onde os termopares básicos não podem ser utilizados.

TUNGSTÊNIO - RHÊNIO

Esses termopares podem ser usados continuamente até 2300 °C e por curto período até 2750 °C.

IRÍDIO 40 % - RHODIO / IRÍDIO

Esses termopares podem ser utilizados por períodos limitados até 2000 °C.

PLATINA - 40% RHODIO / PLATINA - 20% R H O D I O

Esses termopares são utilizados em substituição ao tipo B onde temperaturas um pouco mais elevadas são requeridas. Podem ser usado continuamente até 1600 °C e por curto período até 1800 °C ou 1850 °C.

OURO- FERRO / CHROMEL

Esses termopares são desenvolvidos para trabalhar em temperaturas criogênicas.

NICROSIL / NISIL

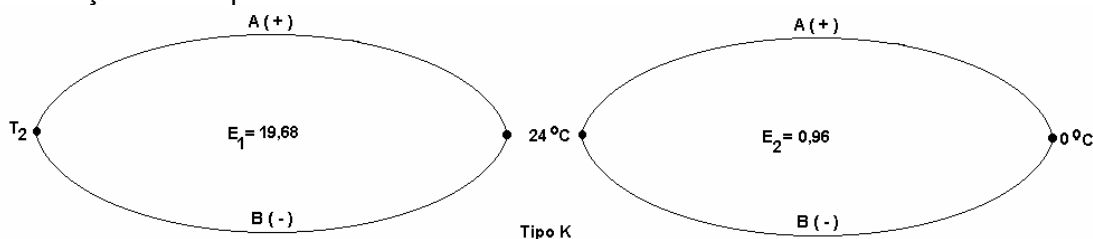
Basicamente, este novo par termoeletrico é um substituto para o par tipo K, apresentando uma força eletromotriz um pouco menor em relação ao tipo K.

3.7 - CORREÇÃO DA JUNTA DE REFERÊNCIA

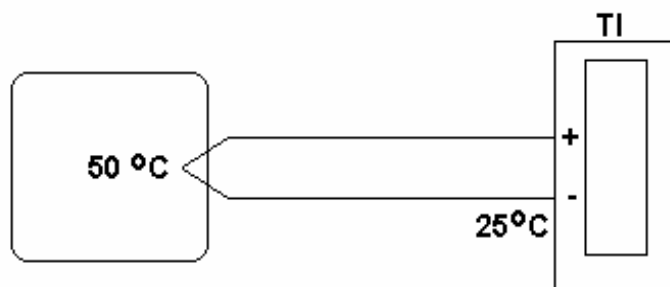
As tabelas existentes da f.e.m. gerada em função da temperatura para os termopares, têm fixado a junta de referência a 0 °C (ponto de solidificação da água), porém nas aplicações práticas dos termopares junta de referência é considerada nos terminais do instrumento receptor e esta se encontra a temperatura ambiente que é normalmente diferente de 0 °C e variável com o tempo, tornando assim necessário que se faça uma correção da junta de referência, podendo esta ser automática ou manual

Os instrumentos utilizados para medição de temperatura com termopares costumam fazer a correção da junta de referência automaticamente, sendo um dos métodos utilizados, a medição da temperatura nos terminais do instrumento, através de circuito eletrônico, sendo que este circuito adiciona a milivoltagem que chega aos terminais, uma milivoltagem correspondente À diferença de temperatura de 0 °C à temperatura ambiente.

Existem também alguns instrumentos em que a compensação da temperatura é fixa em 20 °C ou 25 °C. Neste caso, se a temperatura ambiente for diferente do valor fixo, o instrumento indicará a temperatura com um erro que será tanto maior quanto maior for a diferença de temperatura ambiente e do valor fixo.



É importante não esquecer que o termopar mede realmente a diferença entre as temperaturas das junções. Então para medirmos a temperatura do ponto desejado precisamos manter a temperatura da junção de referência invariável.



$$\begin{aligned} \text{FEM} &= \text{JM} - \text{JR} \\ \text{FEM} &= 2,25 - 1,22 \\ \text{FEM} &= 1,03 \text{ mV} \rightarrow 20^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Esta temperatura obtida pelo cálculo está errada pois o valor da temperatura correta que o meu termômetro tem que medir é de 50 °C.

$$\begin{aligned} \text{FEM} &= \text{JM} - \text{JR} \\ \text{FEM} &= 2,25 - 1,22 \\ \text{FEM} &= 1,03 \text{ mV} + \text{a mV correspondente a temperatura ambiente para fazer a compensação automática, portanto:} \\ \text{FEM} &= \text{mV JM} - \text{mV JR} + \text{mV CA (Compensação automática)} \\ \text{FEM} &= 2,25 - 1,22 + 1,22 \\ \text{FEM} &= 2,25 \text{ mV} \rightarrow 50^\circ\text{C} \end{aligned}$$

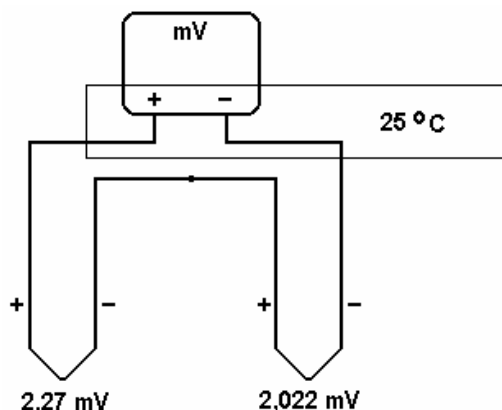
A leitura agora está correta, pois 2,25 mV corresponde a 50 °C que é a temperatura do processo.

Hoje em dia a maioria dos instrumentos fazem a compensação da junta de referência automaticamente. A compensação da junta de referência pode ser feita manualmente. Pega-se o valor da mV na tabela correspondente a temperatura ambiente e acrescenta-se ao valor de mV lido por um milivoltímetro.

3.8 - ASSOCIAÇÃO DE TERMOPARES

3.8.1 - Associação série

Podemos ligar os termopares em série simples para obter a soma das mV individuais. É a chamada termopilha. Este tipo de ligação é muito utilizada em pirômetros de radiação total, ou seja, para soma de pequenas mV.



O instrumento de medição pode ou não compensar a mV da junta de referência. Se compensar deverá compensar uma mV correspondente ao no de termopares aplicados na associação.

Exemplo.: 3 termopares \rightarrow mVJR = 1 mV \rightarrow compensa 3 mV

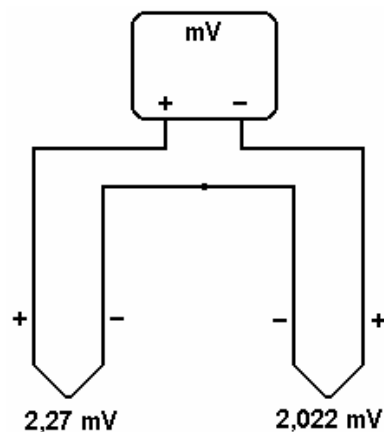
3.8.2 - Associação série - oposta

Para medir a diferença de temperatura entre 2 pontos ligamos os termopares em série oposta.

O que mede maior temperatura vai ligado ao positivo do instrumento.

Os termopares sempre são do mesmo tipo.

Exemplo: Os termopares estão medindo 56 °C e 50 °C respectivamente, a diferença das FEMs será medida pelo milivoltímetro



$$\begin{aligned} \text{FEM T} &= \text{FEM2} - \text{FEM1} & 56\text{ °C} &= 2,27\text{ mV} \\ \text{FEM T} &= 2,27 - 2,022 & 50\text{ °C} &= 2,022\text{ mV} \\ \text{FEM T} &= 0,248\text{ mV} = 6\text{ °C} \end{aligned}$$

Não é necessário compensar a temperatura ambiente desde que as juntas de referência estejam à mesma temperatura.

3.8.3 Associação em paralelo

Ligando 2 ou mais termopares em paralelo a um mesmo instrumento, teremos a média das mV geradas nos diversos termopares se as resistências internas foram iguais.

3.9 - FIOS DE COMPENSAÇÃO E EXTENSÃO

Na maioria das aplicações industriais de medição de temperatura, através de termopares, o elemento sensor não se encontra junto ao instrumento receptor.

Nestas condições torna-se necessário que o instrumento seja ligado ao termopar, através de fios que possuam uma curva de força eletromotriz em função da temperatura similar aquela do termopar, afim de que no instrumento possa ser efetuada a correção na junta de referência.

Definições

1- Convencionam-se chamar de fios aqueles condutores constituídos por um eixo sólido e de cabos aqueles formados por um feixe de condutores de bitola menor, formando um condutor flexível.

2- Chama-se de fios ou cabos de extensão aqueles fabricados com as mesmas ligas dos termopares a que se destinam. Exemplo: Tipo TX, JX, EX e KX.

3- Chama-se de fios ou cabos de compensação aqueles fabricados com ligas diferentes das dos termopares a que se destinam, porém que forneçam, na faixa de utilização recomendada, uma curva da força eletromotriz em função da temperatura equivalente à desses termopares. Exemplo: Tipo SX e BX.

4- Chama-se fio termopar aquele isolado eletricamente, que pode ser utilizado com ou sem outra proteção mecânica ou térmica. Sua faixa de utilização fica delimitada em função do tipo de par termoeletrônico e do limite de utilização do material isolante.

Os fios e cabos de extensão e compensação são recomendados na maioria dos casos para utilização desde a temperatura ambiente até um limite máximo de 200 °C.

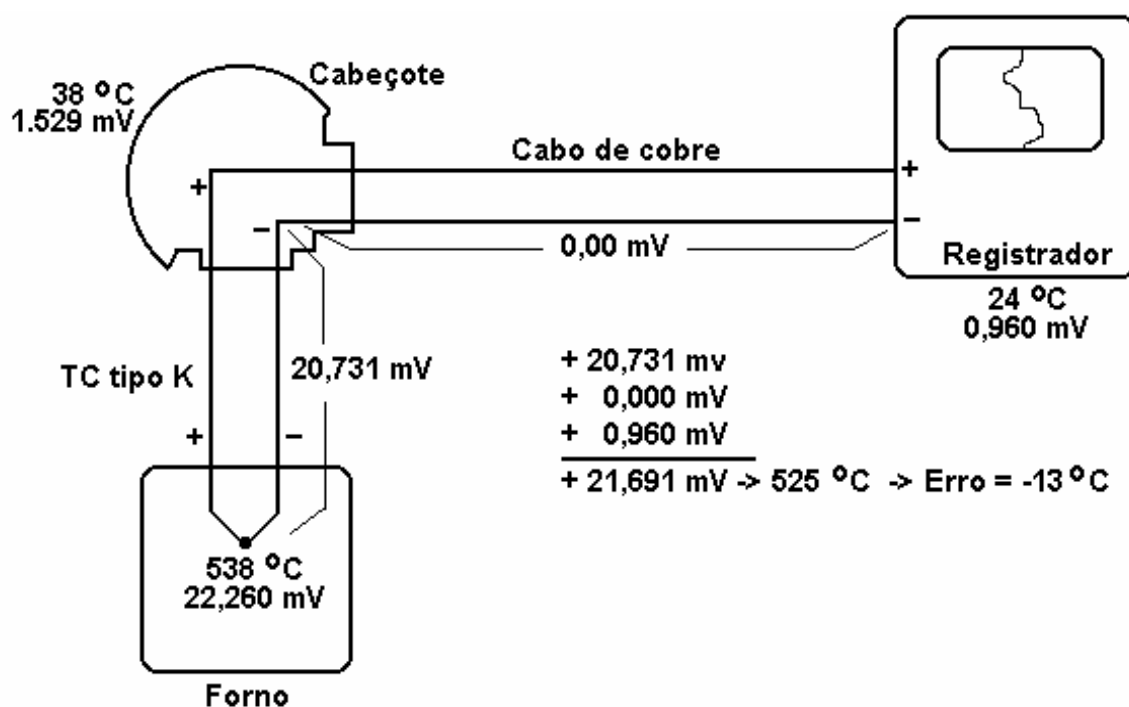
3.10 - ERROS DE LIGAÇÃO

3.10.1 - Usando fios de cobre

Geralmente na aplicação industrial, é necessário que o termopar e o instrumento encontrem-se relativamente afastados, por não convir que o aparelho esteja demasiadamente próximo ao local onde se mede a temperatura. Nestas circunstâncias deve-se, processar a ligação entre os terminais do cabeçote e o aparelho, através de fios de extensão ou compensação.

Tal, procedimento é executado sem problemas desde que, o cabeçote onde estão os terminais do termopar e o registrador, estejam a mesma temperatura de medição.

Vejamos o que acontece quando esta norma não é obedecida.

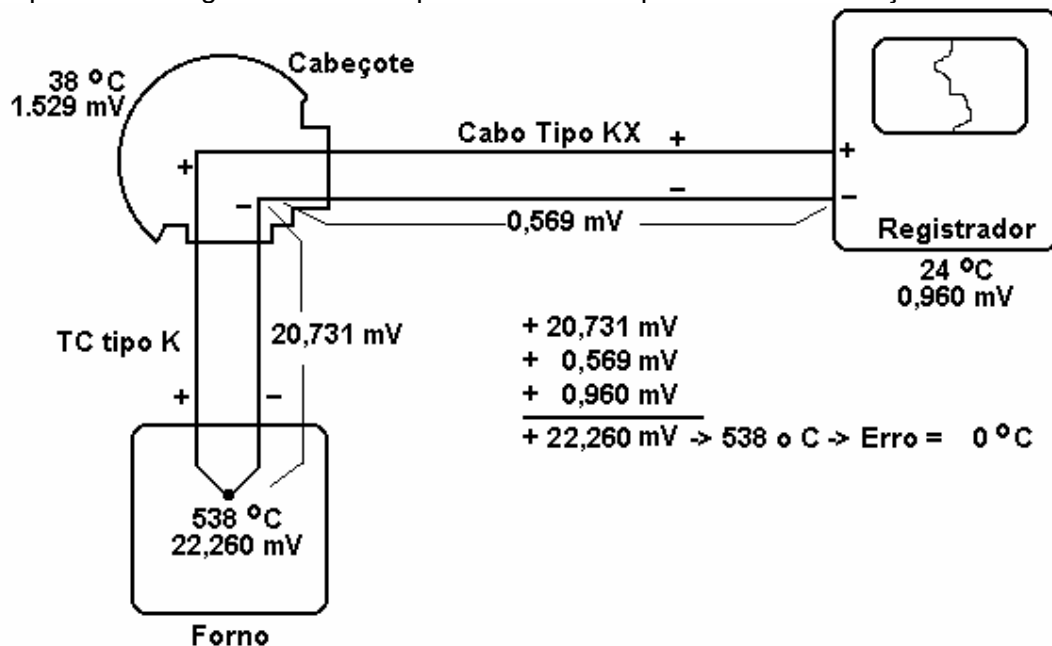


Na figura um termopar de Chromel - Alumel é colocado em um forno, cuja a temperatura é de 538 °C. Das tabelas características dos termopares constata-se que a FEM é de 22,26 mV na junta de medição. As extremidades do termopar encontra-se em um cabeçote, onde são conectados a um fio duplo de cobre, que daí prossegue até um registrador a 24 °C. Pode-se facilmente verificar pela ilustração, que a FEM gerada no cabeçote é 1,529 mV, portanto, a FEM efetiva nos terminais do cabeçote é de 20,731 mV (22,26 - 1,529).

Esta é a FEM efetiva, que está chegando ao registrador e é adicionada a mV gerada pelo compensador automático de temperatura do registrador, ou seja, 20,731 mV + 0,96 mV que será igual a 21,69 mV. Esta FEM (21,69 mV) corresponde a uma temperatura de 525 °C, existindo, portanto um erro de 13 °C. Porém considerando-se que é necessário estar o registrador a uma temperatura próxima da ambiente, como poderíamos corrigir este erro ?

Uma solução simples é que normalmente é usada na prática, será a inserção de fios de compensação entre o cabeçote e o registrador . Estes fios de compensação em síntese, nada mais são que outros termopares cuja função é compensar a queda da FEM que aconteceu no caso estudado, ocasionada pela diferença de temperatura entre o cabeçote e o registrador.

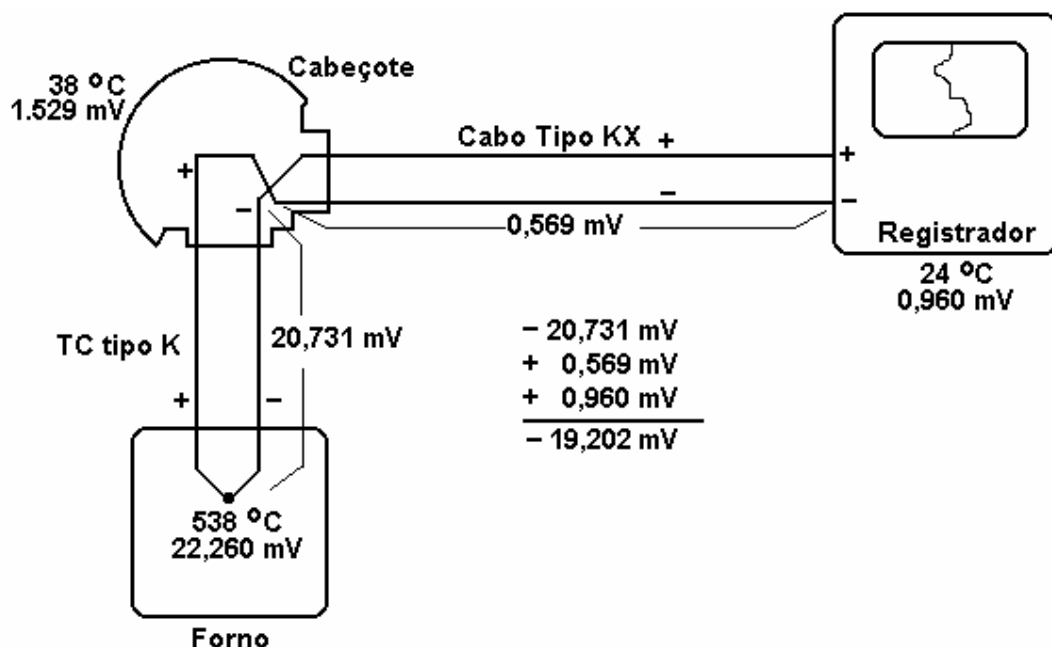
Vejam os que acontece se, no exemplo anterior, ao invés de cobre usamos um fio compensado. A figura mostra de que maneira se processa a instalação.



Como no caso acima, a FEM efetiva no cabeçote é de 20,74 mV. Dela , até o registrador, são utilizados fios de extensão compensados, os quais adicionam à FEM uma parcela igual a 0,57 mV, fazendo assim com que chegue ao registrador uma FEM efetiva de 22,26 mV. Este valor corresponderá a temperatura real dentro do forno (538 °C). A vantagem desta técnica provém do fato de que os fios de compensação, além de terem custo menor que os fios do termopar propriamente dito, também são mais resistentes.

3.10.2 - Inversão simples

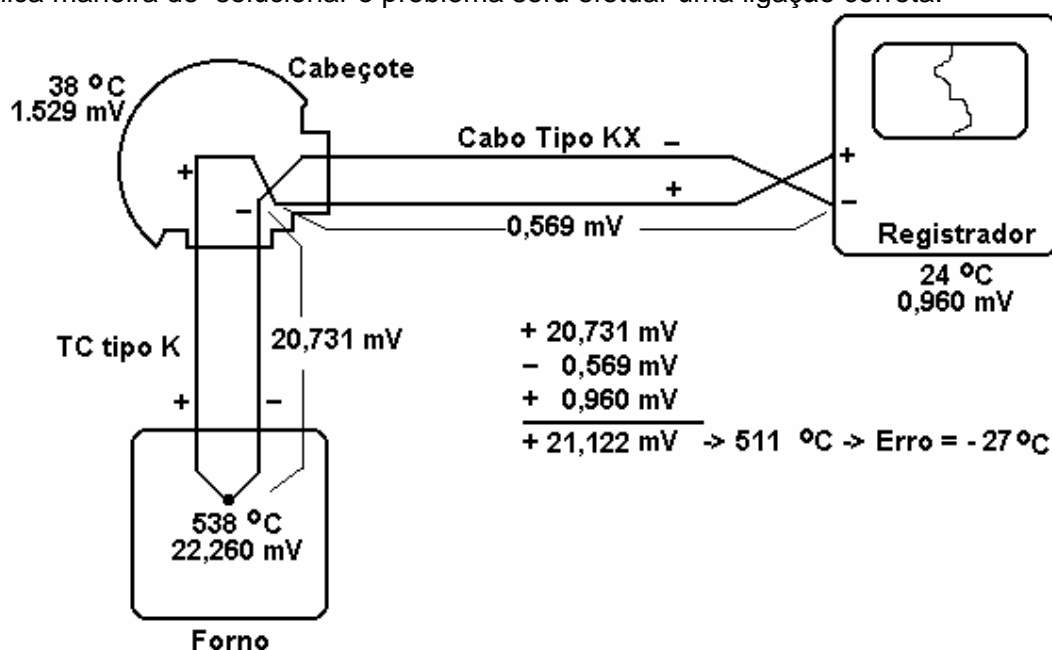
Conforme o esquema a seguir, os fios de compensação foram invertidos.



Assume-se que o forno esteja a 538 °C, o cabeçote a 38 °C e o registrador a 24 °C. Devido a diferença de temperatura entre o cabeçote e o registrador, será gerada uma FEM de 0,57 mV. Porém em virtude da simples inversão, o fio positivo está ligado no borne negativo do registrador e vice-versa. Isto fará com que a FEM produzida ao longo do circuito se oponha àquela do circuito de compensação automática do registrador. Isto fará com que o registrador indique uma temperatura negativa.

3.10.3 - Inversão dupla

No caso a seguir, consideramos o caso da existência de uma dupla inversão: Isto acontece com frequência pois, quando uma simples inversão é constatada, é comum pensar-se que uma nova troca de ligação dos terminais compensará o erro. Porém isto não acontece, e a única maneira de solucionar o problema será efetuar uma ligação correta.



É evidente que se o cabeçote e o registrador estiverem a uma mesma temperatura, a dupla inversão não ocasionará discrepância na medição, contudo, estudaremos o caso em que o cabeçote e o registrador estão a temperaturas desiguais.

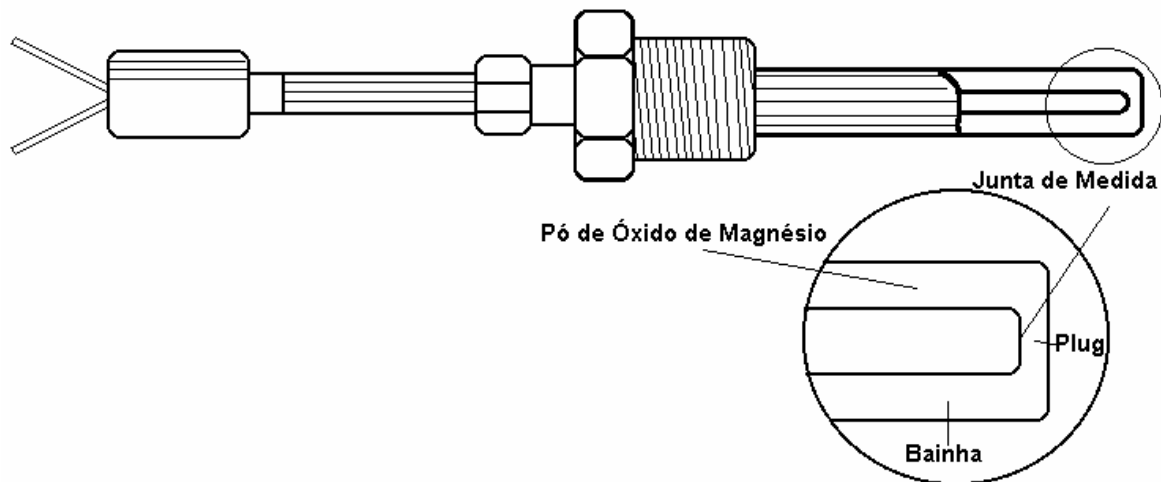
O cabeçote está a 38 °C e o registrador a 24 °C. Novamente consideramos como sendo 538 °C a temperatura do forno. Neste caso a mV efetiva do termopar será de 20,74 mV. A FEM gerada pelos fios de compensação será de 0,57 mV só que estes estão invertidos. A FEM

gerada pelo termopar e os fios de compensação será acrescida da mV gerada pela compensação automática do registrador. Verificamos então que a temperatura indicada pelo registrador apresenta um erro de 27 °C devido ao erro da dupla inversão.

3.11 - TERMOPAR DE ISOLAÇÃO MINERAL

O termopar de isolação mineral é constituído de um ou dois pares termoelétricos, envolvidos por um pó isolante de óxido de magnésio, altamente compactado em uma bainha externa metálica. Devido a esta construção, os condutores do par termoelétrico ficam totalmente protegidos contra a atmosfera exterior, consequentemente a durabilidade do termopar depende da resistência a corrosão da sua bainha e não da resistência a corrosão dos condutores. Em função desta característica, a escolha do material da bainha é fator importante na especificação destes.

3.11.1 - Vantagens dos termopares de isolação mineral



A. ESTABILIDADE NA FORÇA ELETROMOTRIZ

A estabilidade da FEM do termopar é caracterizada em função dos condutores estarem completamente protegidos contra a ação de gases e outras condições ambientais, que normalmente causam oxidação e consequentemente perda da FEM gerada.

B. RESISTÊNCIA MECÂNICA

O pó muito bem compactado, contido dentro da bainha metálica, mantém os condutores uniformemente posicionados, permitindo que o cabo seja dobrado achatado, torcido ou estirado, suporte pressões externas e choque térmico, sem qualquer perda das propriedades termoelétricas.

C. DIMENSÃO REDUZIDA

O processo de fabricação permite a produção de termopares de isolação mineral, com bainhas de diâmetro externo até 1,0 mm, permitindo a medida de temperatura em locais que não eram anteriormente possíveis com termopares convencionais.

D. IMPERPEABILIDADE A ÁGUA, ÓLEO E GÁS

A bainha metálica assegura a impermeabilidade do termopar a água, óleo e gás.

E. FACILIDADE DE INSTALAÇÃO

A maleabilidade do cabo, a sua pequena dimensão, longo comprimento grande resistência mecânica, asseguram facilidade de instalação, mesmo nas situações mais difíceis.

F. ADAPTABILIDADE

A construção do termopar de isolamento mineral permite que o mesmo seja tratado como se fosse um condutor sólido. Em sua capa metálica podem ser montados acessórios, por soldagem ou brasagem e quando necessário, sua seção pode ser reduzida ou alterada em sua configuração.

G. RESPOSTA MAIS RÁPIDA

A pequena massa e a alta condutividade térmica do pó de óxido de magnésio, proporcionam ao termopar de isolamento mineral um tempo de resposta que é virtualmente igual ao de um termopar descoberto de dimensão equivalente.

H. RESISTÊNCIA A CORROSÃO

As bainhas podem ser selecionadas adequadamente para resistir ao ambiente corrosivo.

I. RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO ELEVADA

O termopar de isolamento mineral tem uma resistência de isolação elevada, numa vasta gama de temperaturas, a qual pode ser mantida sob condições mais úmidas.

J. BLINDAGEM ELETROSTÁTICA

A bainha do termopar de isolamento mineral, devidamente aterrada, oferece uma perfeita blindagem eletrostática ao par termoeletrico.

4 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMORRESISTÊNCIA

Os métodos de utilização de resistências para medição de temperatura iniciaram-se ao redor de 1835, com Faraday, porém só houve condições de se elaborar as mesmas para utilização em processos industriais a partir de 1925.

Esses sensores adquiriram espaço nos processos industriais por suas condições de alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso.

Devido a estas características, esse sensor é padrão internacional para a medição de temperatura na faixa de -270 °C a 660 °C. em seu modelo de laboratório.

4.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Os bulbos de resistência são sensores que se baseiam no princípio de variação da resistência em função da temperatura. Os materiais mais utilizados para a fabricação destes tipos de sensores são a platina, cobre ou níquel, que são metais que apresentam características de:

- a) Alta resistividade, permitindo assim um melhor sensibilidade do sensor.
- b) Ter alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura.
- c) Ter rigidez e ductilidade para ser transformado em fios finos.

A equação que rege o fenômeno é a seguinte:

Para faixa de -200 a 0 °C:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 \cdot (T - 100)]$$

Para faixa de 0 a 850 °C:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2]$$

onde: R_t = resistência na temperatura T (Ω)

R_0 = resistência a 0 °C (Ω)

T = temperatura (°C)

A, B, C = coeficientes inerentes do material empregado

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,802 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,2735 \cdot 10^{-12}$$

O número que expressa a variação de resistência em função da temperatura é chamado de alfa (α) e se relaciona da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$$

Um valor típico de alfa para $R_{100} = 138,50 \, \Omega$ é de $3,850 \cdot 10^{-3} \, \Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ segundo a DIN IEC 751/85.

4.2 - CONSTRUÇÃO FÍSICA DO SENSOR

O bulbo de resistência se compõe de um filamento, ou resistência de Pt, Cu ou Ni, com diversos revestimentos, de acordo com cada tipo e utilização.

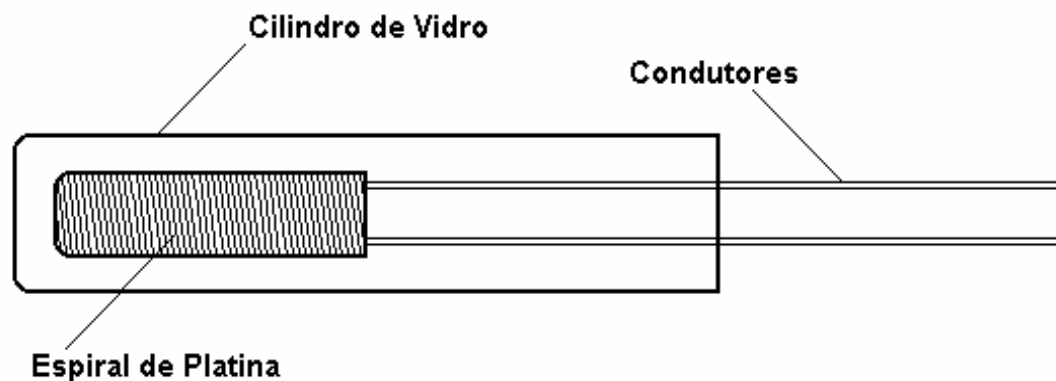
As termorresistências de Ni e Cu têm sua isolamento normalmente em esmalte, seda, algodão ou fibra de vidro. Não existe necessidade de proteções mais resistentes a temperatura, pois acima de $300 \, ^\circ\text{C}$ o níquel perde suas propriedades características de funcionamento como termorresistência e o cobre sofre problemas de oxidação em temperaturas acima de $310 \, ^\circ\text{C}$.

Os sensores de platina, devido a suas características, permitem um funcionamento até temperaturas mais elevadas, têm seu encapsulamento normalmente em cerâmica ou vidro. A este sensor são dispensados maiores cuidados de fabricação pois, apesar da Pt não restringir o limite de temperatura de utilização, quando a mesma é utilizada em temperaturas elevadas, existe o risco de contaminação dos fios.

Para utilização como termômetro padrão, os sensores de platina são completamente desapoitados do corpo de proteção. A separação é feita por isoladores, espaçadores de mica, conforme desenho abaixo. Esta montagem não tem problemas relativos a dilatação, porém é extremamente frágil.

Os medidores parcialmente apoiados têm seus fios introduzidos numa peça de alumina de alta pureza com fixador vítreo. É um meio termo entre resistência a vibração e dilatação térmica.

A versão completamente apoiada pode suportar vibrações muito mais fortes, porém sua faixa de utilização fica limitada a temperaturas mais baixas, devido a dilatação dos componentes.



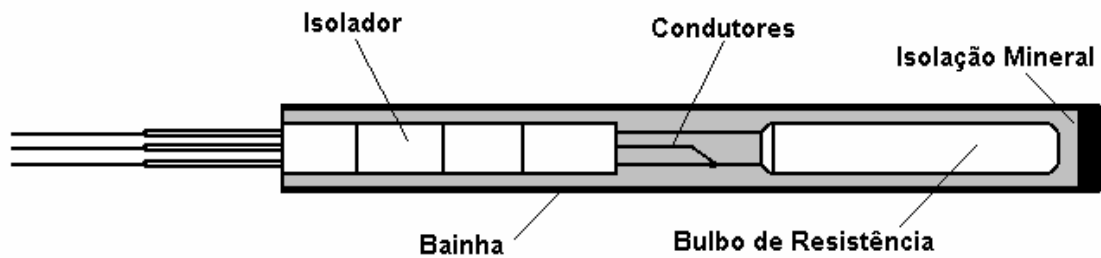
4.3 - CARACTERÍSTICAS DA TERMORESISTÊNCIA DE PLATINA

As termorresistências Pt 100 são as mais utilizadas industrialmente, devido a sua grande estabilidade, larga faixa de utilização e alta precisão. Devido à alta estabilidade das termorresistências de platina, as mesmas são utilizadas como padrão de temperatura na faixa de $-270 \, ^\circ\text{C}$ a $660 \, ^\circ\text{C}$. A estabilidade é um fator de grande importância na indústria, pois é a capacidade do sensor manter e reproduzir suas características (resistência - temperatura) dentro da faixa especificada de operação.

Outro fator importante num sensor Pt 100 é a repetibilidade, que é a característica de confiabilidade da termorresistência. Repetibilidade deve ser medida com leitura de temperaturas consecutivas, verificando-se a variação encontrada quando de medição novamente na mesma temperatura.

O tempo de resposta é importante em aplicações onde a temperatura do meio em que se realiza a medição está sujeito a mudanças bruscas.

Considera-se constante de tempo como tempo necessário para o sensor reagir a uma mudança de temperatura e atingir 63,2 % da variação da temperatura.



Na montagem tipo isolamento mineral, tem-se o sensor montado em um tubo metálico com uma extremidade fechada e preenchido todos os espaços com óxido de magnésio, permitindo uma boa troca térmica e protegendo o sensor de choques mecânicos. A ligação do bulbo é feita com fios de cobre, prata ou níquel isolados entre si, sendo a extremidade aberta, selada com resina epoxi, vedando o sensor do ambiente em que vai atuar.

Este tipo de montagem permite a redução do diâmetro e apresenta rápida velocidade de resposta.

4.4 - VANTAGENS E DESVANTAGENS

VANTAGENS:

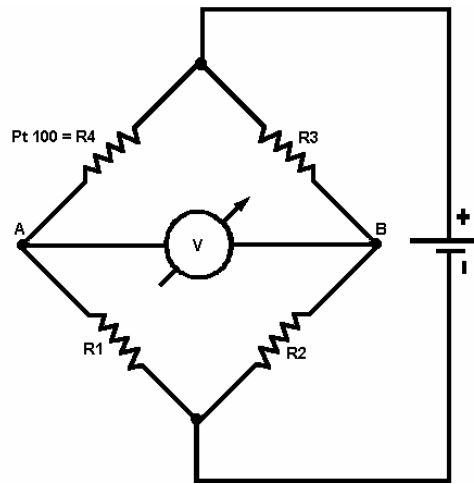
- a) Possuem maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensores.
- b) Com ligação adequada não existe limitação para distância de operação.
- c) Dispensa utilização de fiação especial para ligação.
- d) Se adequadamente protegido, permite utilização em qualquer ambiente.
- e) Têm boas características de reprodutibilidade.
- f) Em alguns casos substitui o termopar com grande vantagem.

DESVANTAGENS

- a) São mais caras do que os sensores utilizados nessa mesma faixa.
- b) Deterioram-se com mais facilidade, caso haja excesso na sua temperatura máxima de utilização.
- c) Temperatura máxima de utilização 630 °C.
- d) É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura equilibrada para indicar corretamente.
- e) Alto tempo de resposta.

4.5 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

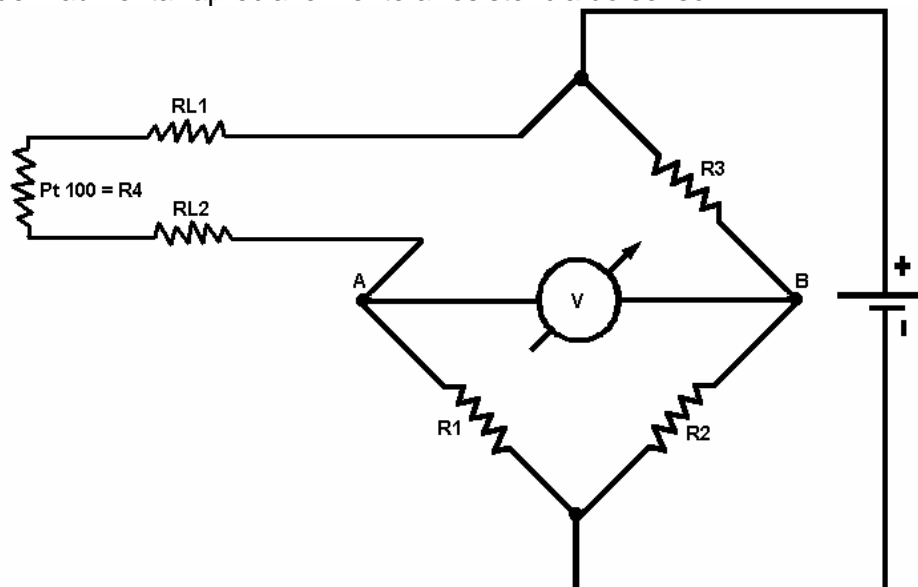
As termorresistências são normalmente ligadas a um circuito de medição tipo Ponte de Wheatstone, sendo que o circuito encontra-se balanceado quando é respeitada a relação $R_4.R_2 = R_3.R_1$ e desta forma não circula corrente pelo detector de nulo, pois se esta relação é verdadeira, os potenciais nos pontos A e B são idênticos. Para utilização deste circuito como instrumento de medida de Termorresistência, teremos as seguintes configurações:



4.5.1 - Ligação à 2 fios

Como se vê na figura, dois condutores de resistência relativamente baixa RL1 e RL2 são usados para ligar o sensor Pt-100 (R4) à ponte do instrumento de medição.

Nesta disposição, a resistência R4 compreende a resistência da Pt-100 mais a resistência dos condutores RL1 e RL2. Isto significa que os fios RL1 e RL2 a menos que sejam de muito baixa resistência, podem aumentar apreciavelmente a resistência do sensor.



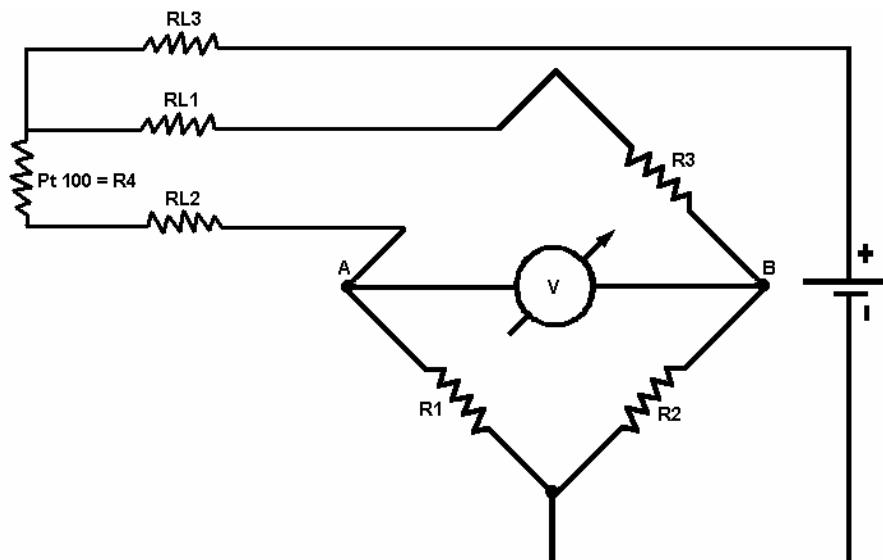
Tal disposição, resultará em erro na leitura da temperatura, a menos que algum tipo de compensação ou ajuste dos fios do sensor de modo a equilibrar esta diferença de resistência. Deve-se notar que, embora a resistência dos fios não se altere em função do tamanho dos fios uma vez já instalado, os mesmos estão sujeitos às variações da temperatura ambiente, o que introduz uma outra possível fonte de erro na medição.

O método de ligação a dois fios, somente deve ser usado quando o sensor estiver a uma distância de aproximadamente 3 metros.

Concluindo, neste tipo de medição a 2 fios, sempre que a temperatura ambiente ao longo dos fios de ligação variar, a leitura de temperatura do medidor introduzirá um erro, devido a variação da resistência de linha.

4.5.2 - Ligação à 3 fios

Este é o método mais utilizado para termorresistências na indústria. Neste circuito a configuração elétrica é um pouco diferente, fazendo com que a alimentação fique o mais próximo possível do sensor, permitindo que a RL1 passe para o outro braço da ponte, balanceando o circuito. Na ligação a 2 fios, as resistências de linha estavam em série com o sensor, agora na ligação a 3 fios elas estão separadas.



Nesta situação, tem-se a tensão EAB, variando linearmente em função da temperatura da PT100 e independente da variação da temperatura ambiente ao longo dos fios de ligação. Este tipo de ligação, garante relativa precisão mesmo com grandes distâncias entre elemento sensor e circuito de medição

5 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO

Ao se medirem temperaturas em que o contato físico com o meio é impossível ou impraticável, faz-se uso da pirometria óptica ou de radiação térmica.

Um corpo aquecido emite energia mesmo que esteja no vácuo. Esta energia, a radiação térmica, é transportada por ondas eletromagnéticas, como a energia luminosa, mas com predominância de frequências bem menores que as do espectro visível, enquanto o corpo está à temperatura não muito elevada.

À medida que se aquece um corpo, a partir de temperaturas da ordem de 500 °C, o corpo começa a ficar visível porque começa a emitir radiações que tem uma fração apreciável com frequência de luz: o espectro visível.

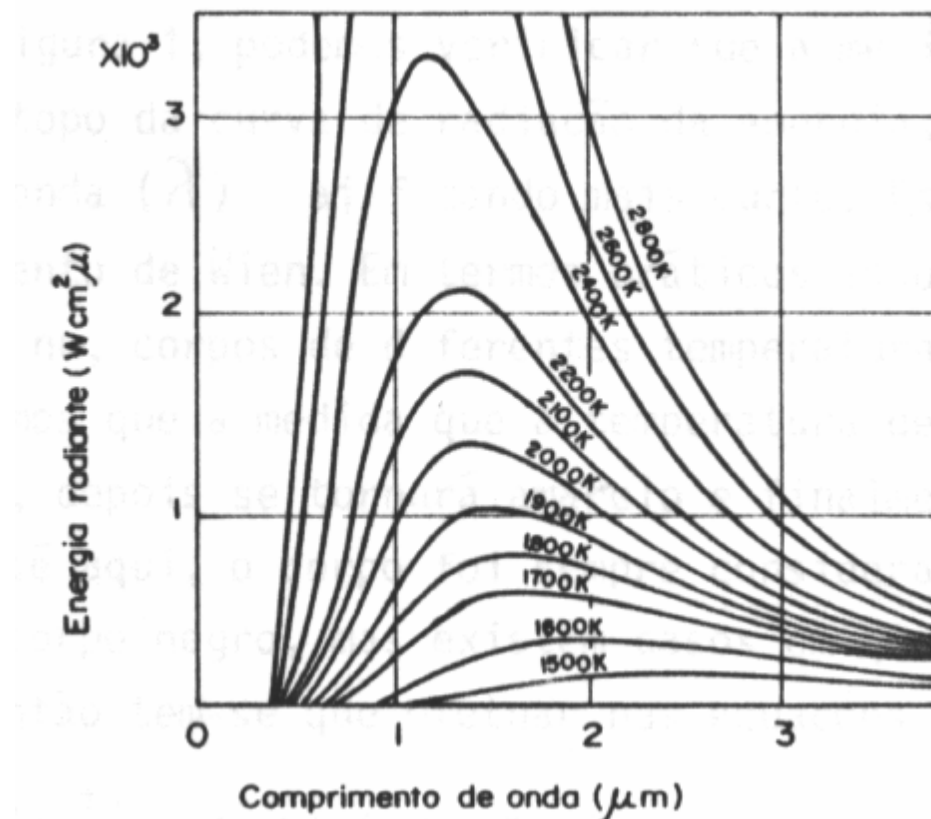
Ainda assim a maior parte da intensidade da radiação tem frequência localizada na região do infravermelho.

Se pudéssemos aquecer indefinidamente o corpo, ele passaria do rubro para o branco e para o azul. Isto indica que a predominância da intensidade de radiação emitida dentro do espectro visível corresponde a frequências crescentes à medida que a temperatura do corpo é elevada.

5.1 - TEORIA DA MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO

Em 1860, Gustav Kirchoff demonstrou a lei que estabelecia a igualdade entre a capacidade de um corpo em absorver e emitir energia radiante. Essa lei é fundamental na teoria da transferência de calor por radiação. Kirchoff também propôs o termo "corpo negro" para designar um objeto que absorve toda a energia radiante que sobre ele incide.

Tal objeto, em consequência, seria um excelente emissor.



Em 1879, Joel Stefan enunciou, a partir de resultados experimentais, a lei que relaciona a radiância de um corpo com a sua temperatura. A radiância, W , é a potência da radiação térmica emitida, por unidade de área da superfície do corpo emissor. Ludwig Boltzmann chegou, em 1884, às mesmas conclusões através da termodinâmica clássica, o que resultou na chamada Lei de Stefan-Boltzmann:

$$W = \varepsilon \cdot \delta \cdot T^4$$

Onde:

W = energia radiante (Watts/m²)

δ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \cdot 10^{-8} \frac{W \cdot K^4}{m^2}$)

T = Temperatura absoluta

ε = Emissividade

Para o corpo negro a máxima emissividade é igual a um. Portanto:

$$W = \delta \cdot T^4$$

Embora o corpo negro seja uma idealização, existem certos corpos como laca preta, placas ásperas de aço, placas de asbesto, com poder de absorção e de emissão de radiação térmica tão altos que podem ser considerado idênticos ao corpo negro.

O corpo negro é considerado, portanto, um padrão com o qual são comparadas as emissões dos corpos reais.

Quando, sobre um corpo qualquer ocorrer a incidência de irradiação, teremos uma divisão dessa energia em três parcelas:

$$W = W_A + W_R + W_T$$

Onde:

W = energia Incidente

W_A = energia absorvida

W_R = energia refletida

W_T = energia transmitida

Sendo:

- Absorvidade : $\alpha = \frac{W_A}{W}$

- W
- Refletividade : $\delta = \frac{WR}{W}$
- Transmissividade : $\tau = \frac{WT}{W}$

Somando-se os três coeficientes para um mesmo comprimento de onda temos:

$$\alpha + \delta + \tau = 1$$

para materiais opacos, $\tau = 0$.

Normalmente a absorvidade é denominada "emissividade" que simbolizaremos por ε , e é influenciada por vários fatores. Os principais são:

- a) Acabamento superficial: as superfícies polidas têm uma baixa absorvidade porque a refletividade é alta.
- b) Natureza do material.
- c) Temperatura da superfície: quando esta aumenta a emissividade também aumenta.

De acordo com Lei de Kirchoff existe uma igualdade entre a capacidade de um corpo em absorver a energia incidente e sua capacidade de reemiti-la. Chama-se a esta última de "emissividade", a qual pode ser assim definida:

"A emissividade é a relação entre a energia irradiada, em um dado comprimento de onda, por um corpo qualquer e um corpo negro à mesma temperatura".

$$\varepsilon = \frac{W(\text{corpo qualquer})}{W(\text{corpo negro})}$$

Assim definida, a emissividade assume sempre valores entre 0 e 1, sendo numericamente iguais à fração de radiação absorvida pelo corpo. Considerando a radiação térmica emitida pelo corpo negro, como composta de ondas eletromagnéticas e obtido experimentalmente o seu espectro em função da temperatura, estava constituído o desafio aos físicos teóricos: explicar este espectro a partir de sua causa microscópica.

Uma onda eletromagnética de rádio ou televisão é emitida por uma antena que essencialmente se constitui de cargas oscilantes, isto é, um oscilador eletromagnético. No caso da radiação emitida por um corpo "as antenas" eram consideradas os osciladores microscópios provenientes da oscilação de cargas moleculares devido à vibração térmica no interior do corpo. Num sólido, a uma determinada temperatura, as diversas moléculas oscilariam nas diversas frequências, emitindo a radiação com o espectro estudado.

Em 1901, o físico alemão Max Planck publicou os resultados do seu estudo da radiação térmica, onde satisfazia todos os requisitos conceituais experimentais da radiação do corpo negro.

5.2- PIRÔMETROS ÓPTICOS

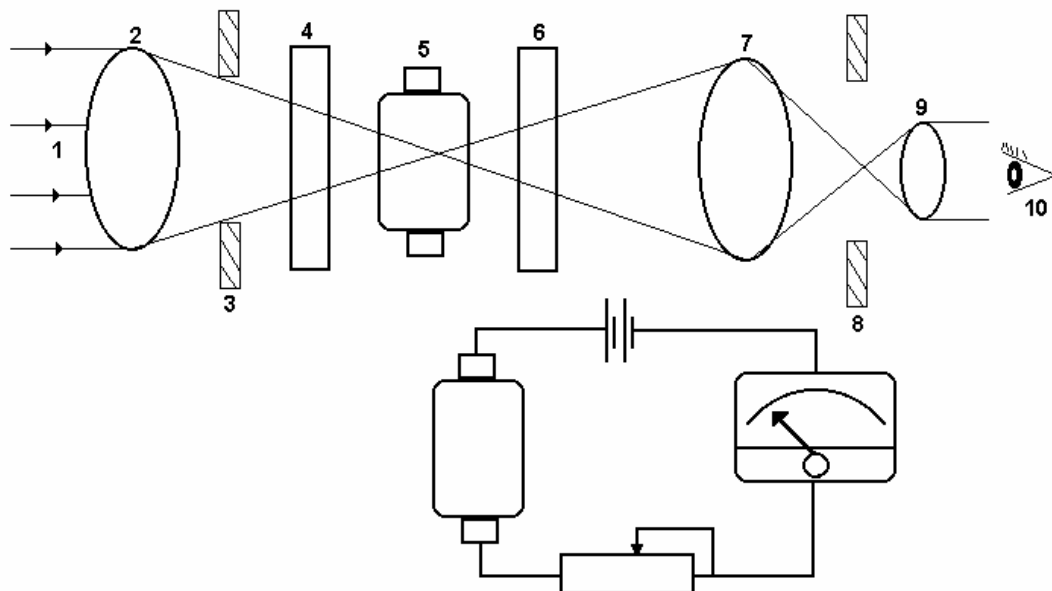
O pirômetro óptico é o dispositivo oficial reconhecido internacionalmente para medir temperaturas acima de 1064,43 °C. É usado para estabelecer a Escala Internacional Prática de Temperatura acima de 1064,43 °C.

O pirômetro óptico mede a intensidade de energia radiante emitida numa faixa estreita do comprimento de onda do espectro visível. A intensidade da luz no espectro visível emitida por um objeto quente varia rapidamente com sua temperatura. Assim, com uma pequena variação da temperatura há uma variação muito maior na luminosidade, o que fornece um meio natural para a determinação de temperaturas com boa precisão.

O pirômetro óptico é um instrumento com o qual a luminosidade desconhecida de um objeto é medida comparando-a com a luminosidade conhecida de uma fonte padrão. Os pirômetros utilizam dois métodos para comparação:

- Variando a intensidade da luz emitida por uma lâmpada padrão (corrente que passa através do filamento) até atingir o mesmo brilho da fonte.
- Variando a luminosidade aparente do corpo quente através de dispositivos ópticos enquanto uma corrente constante atravessa o filamento da lâmpada padrão que permanece com brilho constante.

A comparação do brilho entre a fonte a ser medida e o filamento da lâmpada é feita por um observador, o que faz com que essa medida dependa, portanto, da sensibilidade do olho humano às diferenças no brilho entre duas fontes da mesma cor.



Ao considerar-se uma aplicação deve-se levar em conta os seguintes dados:

- Os limites normais de utilização estão entre 750 °C e 2850 °C. Com filtros de absorção especiais, pode-se estender sua calibração até 5500 °C.
- As medidas efetuadas com pirômetros ópticos são independentes da distância entre a fonte e o aparelho, além de que são providos de um conjunto de lentes que aproxima o objetivo a ser medido.
- Em uso industrial, consegue-se uma precisão de até $\pm 2\%$.
- Devido à medida de temperatura ser baseada na emissividade da luz (brilho), erros significativos podem ser criados, devido à reflexão de luz ambiente pela fonte a ser medida.
- Quando o meio onde se executa a medida possui partículas em suspensão, causando assim uma diminuição da intensidade da luz proveniente da fonte, diminuindo a precisão da medição.

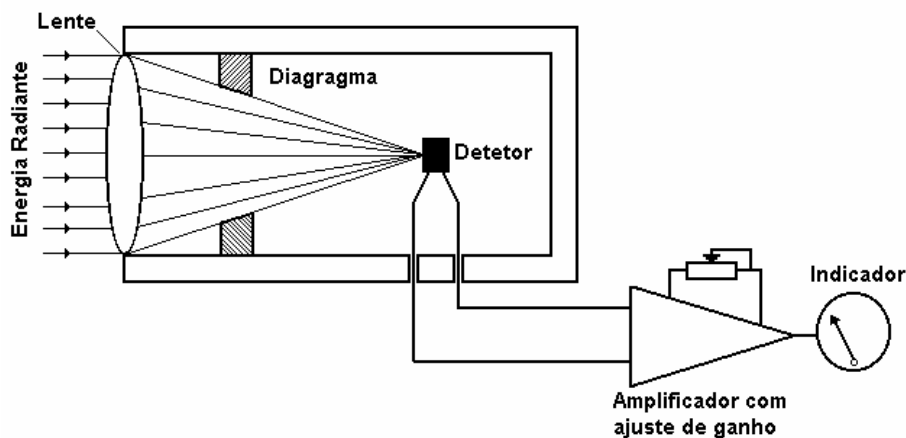
5.3 - RADIÔMETRO OU PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO

Os radiômetros (ou pirômetros de radiação) operam essencialmente segundo a lei de Stefan-Boltzmann. São os sistemas mais simples, neles a radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detector do tipo termopilha (associação em série- ver figura abaixo) ou do tipo semiconductor nos mais modernos, onde gera um sinal elétrico no caso da termopilha ou altera o sinal elétrico no caso do semiconductor.

Como não possuem mecanismo de varredura próprio, o deslocamento do campo de visão instantâneo é realizado pela movimentação do instrumento como um todo. Os radiômetros são em geral portáteis, mas podem ser empregados também no controle de processos a partir de montagens mecânicas fixas ou móveis.

Graças à utilização de microprocessadores, os resultados das medições podem ser memorizadas para o cálculo de temperaturas e seleção de valores.

A apresentação dos resultados é normalmente feita através de mostradores analógicos e digitais, podendo ainda ser impressa em papel ou gravada em fita magnética para posterior análise. Alguns radiômetros são diretamente conectados com unidades de controle ou registradores através de interface analógica/digital.



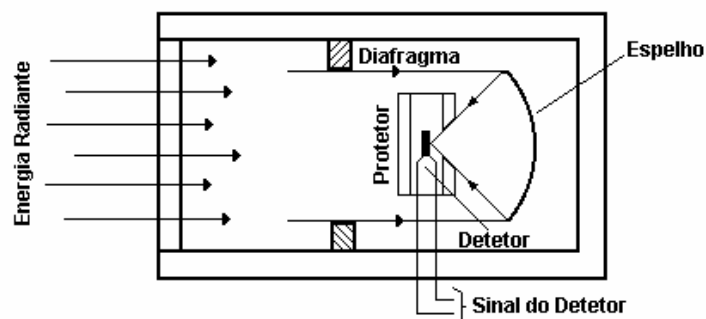
Os radiômetros são usados industrialmente onde:

- As temperaturas estão acima da faixa de operação prática dos termopares.
- A atmosfera do processo for prejudicial aos pares termoeletrônicos, causando medidas falsas e pequena durabilidade ao par .
- No interior de fornalhas a vácuo ou pressão, onde os sensores de temperatura danificam o produto.
- O objeto cuja temperatura se vai medir está em movimento.
- Em locais onde os termopares não podem ser instalados, por causa de vibrações, choques mecânicos ou impossibilidade de montagem.

Ao considerar-se uma aplicação deve-se levar em conta os seguintes dados:

- A temperatura do alvo e a temperatura normal de operação.
- O sinal de saída é independente da distância do alvo, desde que o campo de visao do sistema óptico esteja preenchido totalmente pelo mesmo.
- O material da fonte e sua emitância.
- Ângulos de visada com aplicações em corpo não negro (deve-se restringir o ângulo para uma visada de 45°, ou menos, da perpendicular).
- As condições do ambiente, temperatura e poeira.
- Velocidade do alvo.

Os radiômetros operam numa faixa entre -30 °C a 4000 °C, respondendo em 0,1 ou 0,2 segundos a 98% da mudança de temperatura com precisão de $\pm 1\%$ da faixa medida.



EXERCÍCIOS

- 1- O que significa termometria ?
- 2- O que significa pirometria ?
- 3- O que significa criometria ?
- 4- Por que a temperatura é uma das variáveis mais importantes na indústria ?
- 5- Defina energia térmica.
- 6- Defina calor.
- 7- Em 1701 o que foi definido por Fahrenheit ?
- 8- O que foi proposto por Celsius em 1742 ?
- 9- Quais são as escalas mais comuns ?
- 10- Defina escalas absolutas de temperatura.
- 11- Qual o limite inferior da temperatura ?
- 12- Onde é mais utilizada a escala Fahrenheit ?
- 13- Onde é mais utilizada a escala Kelvin ?
- 14- Qual a relação matemática entre $^{\circ}\text{C}$ x $^{\circ}\text{F}$?
- 15- Qual a relação matemática entre $^{\circ}\text{C}$ x K ?
- 16- Qual a relação matemática entre $^{\circ}\text{F}$ x $^{\circ}\text{R}$?
- 17- Qual a relação matemática entre K x $^{\circ}\text{R}$?
- 18- Defina ponto fixo de temperatura.

a) $200^{\circ}\text{C} = ?^{\circ}\text{R}$

b) $0^{\circ}\text{F} = ?^{\circ}\text{C}$

c) $310^{\circ}\text{R} = ?^{\circ}\text{K}$

d) $34^{\circ}\text{F} = ?^{\circ}\text{K}$

e) $98^{\circ}\text{C} = ?^{\circ}\text{K}$

f) $587^{\circ}\text{K} = ?^{\circ}\text{F}$

g) $471^{\circ}\text{K} = ?^{\circ}\text{C}$

h) $874^{\circ}\text{F} = ?^{\circ}\text{K}$

i) $-41^{\circ}\text{C} = ?^{\circ}\text{F}$

19 - A que temperatura a leitura fornecida pela escala Fahrenheit é o dobro da fornecida pela escala Celsius ?

20 - Imaginemos uma nova escala que atribua o valor de -20° ao ponto de gelo e 230° ao ponto de ebulição. Que leitura esta escala fornecerá para a escala de 20°C ?

21 - Dois termômetros, um graduado na escala Celsius e outro na escala Fahrenheit, fornecem a mesma leitura para a temperatura de um gás. Determine o valor desta temperatura.

22 - A temperatura média do corpo humano é de $36,5^{\circ}\text{C}$. Determine o valor dessa temperatura na escala Fahrenheit.

23 - No deserto do Saara registrou-se certo dia uma temperatura de $X^{\circ}\text{C}$. Se a escala utilizada tivesse sido a Fahrenheit, a leitura seria 12 unidades mais alta. Determine o valor desta temperatura.

- 24 . Qual o princípio de funcionamento do termômetro de dilatação de líquido ?
- 25 . Qual é a expressão matemática que representa o fenômeno de dilatação de líquido ?
- 26 . Quais são os tipos de construção de termômetros de dilatação de líquidos?
27. Quais são os tipos de líquidos mais utilizados ?
- 28 . Onde são mais utilizados os termômetros de vidro ?
- 29 . Qual é o princípio de funcionamento do termômetro de dilatação de líquido de recipiente metálico ?
- 30 . Quais são as partes que compõe o termômetro de dilatação de líquido de recipiente metálico ?
- 31 . Defina o bulbo do termômetro de dilatação de líquido de recipiente metálico.
- 32 . Defina o capilar do termômetro de dilatação de líquido de recipiente metálico.
- 33 . Defina o elemento sensor do termom. de dilatação de líquido de recipiente metálico.
- 34 . Quais são os tipos de líquido utilizados nos recipientes metálicos ?

- 35 . Como pode ser feita a compensação automática da temperatura ambiente
- 36 . Explique como funciona a compensação na caixa do medidor.
- 37 . Explique como funciona a compensação total.
- 38 . Explique como funciona a compensação no capilar.
- 39 . Qual o princípio de funcionamento do termômetro de dilatação de gás ?
- 40 . Qual a expressão matemática que define a dilatação de gás ?
- 41 . Quais são os tipos de gás de enchimento ?
- 42 . Qual o princípio de funcionamento do termômetro á tensão de vapor ?
- 43 . Por que as escalas dos termômetros á tensão de vapor não são lineares ?
- 44 . Quais são os tipos de líquidos de enchimento do termômetro á tensão de vapor ?
- 45 . Qual o princípio de funcionamento do termômetro bimetálico ?

46 . Qual a expressão matemática que define a dilatação dos metais ?

47. Quais são os 2 problemas graves dos termômetros bimetálicos ?

48. No que consiste o termômetro bimetálico ?

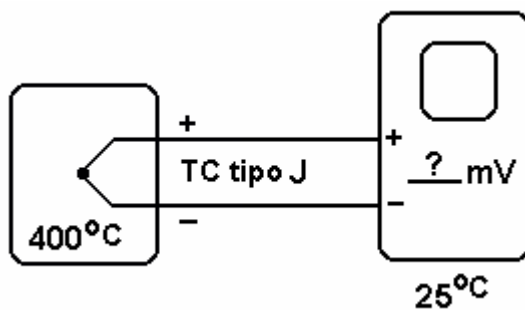
49 . Normalmente, qual o material da lâmina bimetálica ?

50 . Como é a escala do termômetro bimetálico ?

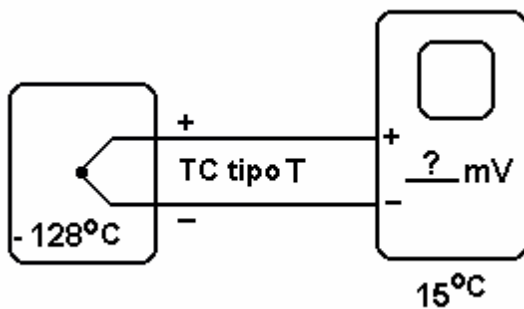
51 . Qual a precisão do termômetro bimetálico ?

52 . Determine os valores pedidos dos esquemas abaixo :

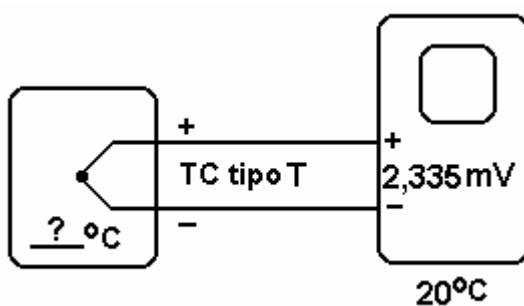
a)



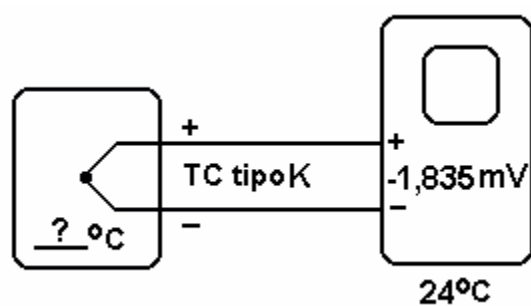
b)



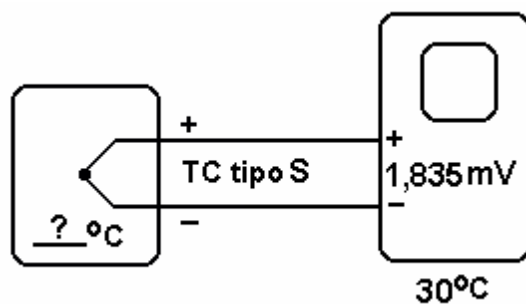
c)



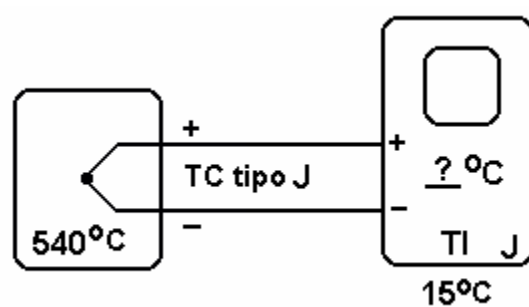
d)



e)

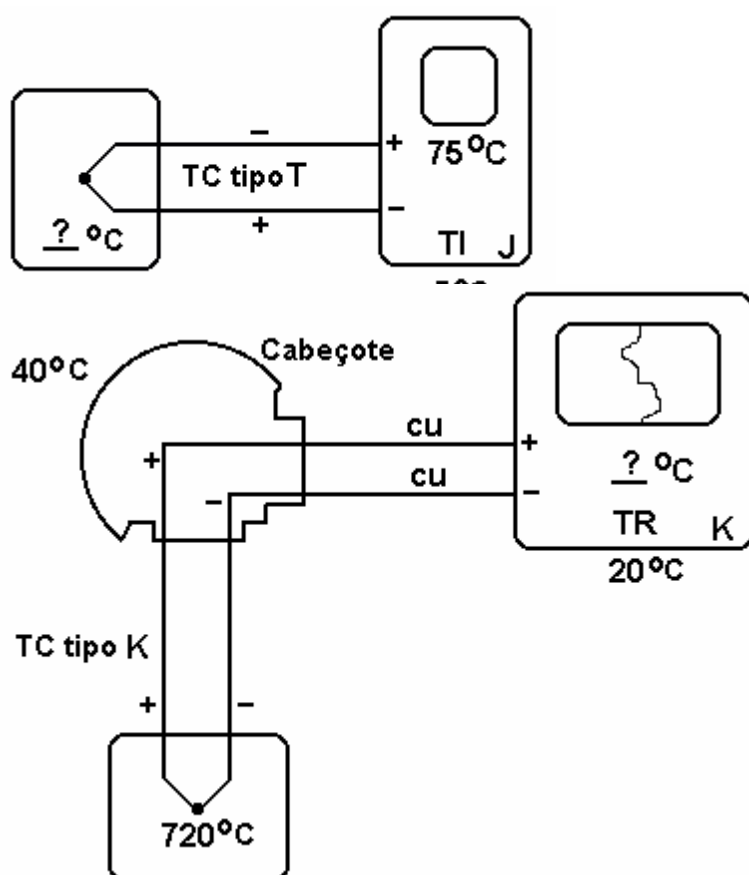


f)

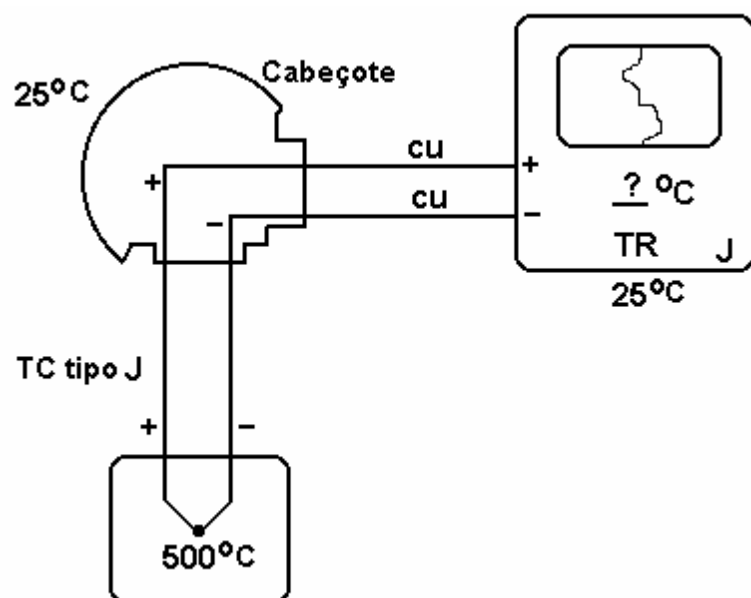


g)

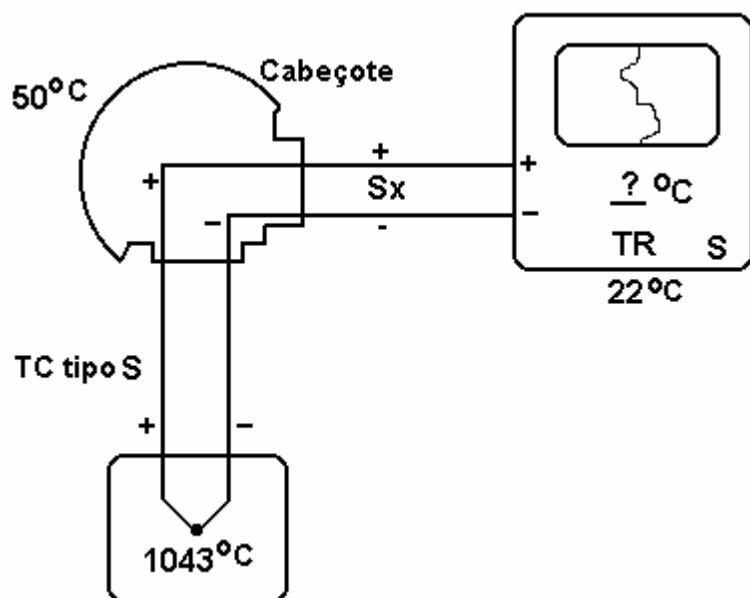
h)



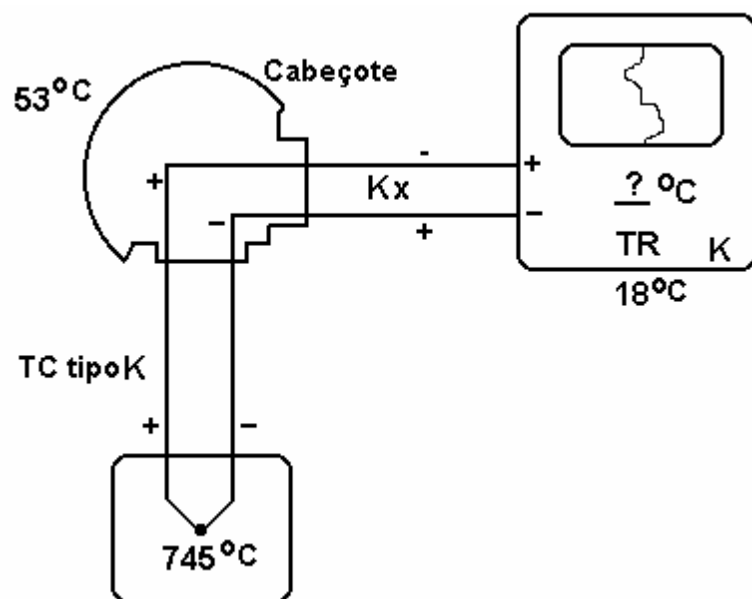
i)



j)



k)



l)

